

Implementación de un Tratamiento Alternativo para la Remoción de Fósforo Y Nitrógeno en Aguas Residuales Mediante Absorbentes a Base de Semillas y Tallos de *Moringa Oleífera Lam.*

Nicolás José Ahumada Triviño

Jorge Eliecer Severiche Betin



Corporación Universidad de la Costa

Departamento de Civil y Ambiental

Programa de Ingeniería Ambiental

Barranquilla

2018

Implementación de un Tratamiento Alternativo para la Remoción de Fósforo Y Nitrógeno en Aguas Residuales Mediante Absorbentes a Base de Semillas y Tallos de *Moringa Oleífera Lam.*

Nicolás José Ahumada Triviño

Jorge Eliecer Severiche Betin

Trabajo de investigación presentado para obtener el título de Ingeniero Ambiental

Asesor:

Leandro Gómez Plata

Co-asesor:

Rubén Darío Cantero Rodelo

Corporación Universidad de la Costa

Departamento de Civil y Ambiental

Programa de Ingeniería Ambiental

Barranquilla

2018

### **Dedicatoria**

A Dios por brindarnos la paciencia, coraje, persistencia y sabiduría suficiente para salir victorioso en la ejecución de este proyecto de grado.

A nuestros padres Omaira, Nicolás, Carmen y Jorge, por ser el principal motor de lucha en este camino, a toda nuestra familia las cuales permanecieron constantes en cada momento, a las experiencias que trajeron consigo tropiezos que nos hicieron madurar como personas, y nos llevaron a la reflexión.

Existieron muchas personas que nos apoyaron en todo el camino recorrido, algunas Dios las colocó al principio, otras en el transcurso y final de esta, agradecemos mucho a todos, compañeros y amigos por haber sido parte de esta batalla, les dedicamos estas palabras donde quieran que se encuentren.

A los que iniciaron con nosotros la carrera y por razones de la vida, no lograron llegar hasta la graduación, a ellos los recordamos con melancolía porque por medio de sus sueños nos dejaron muchas enseñanzas y por eso nos nace tenerlos presente en este momento.

### **Agradecimientos**

Agradecemos primeramente a Dios, por poner en nuestras vidas el deseo de la realización de este proyecto de grado, por las fortalezas que descubrimos en cada uno de las situaciones difíciles que se presentaron.

A nuestros padres por el apoyo incondicional, en cada uno de los procesos de nuestra educación, y por las enseñanzas de vida compartidas.

Al nuestro asesor Leandro Gómez Plata, por brindarnos su apoyo y conocimiento, al guiarnos en todas las etapas desarrolladas en el proyecto de grado.

Al ingeniero Rubén Darío Cantero, co-asesor, por los aportes, que permitieron el desarrollo del proyecto de grado.

A todos los docentes, desde el inicio de la carrera de ingeniero Ambiental, por el gran aporte a los conocimientos adquiridos en las etapas de aprendizaje, que fueron el pilar esencial al éxito del desarrollo experimental del trabajo de grado desarrollado.

### Resumen

En el presente proyecto de grado se planteó un tratamiento alternativo para la remoción de Nitratos y Fosfatos de las aguas residuales por medio de adsorbentes elaborados a partir de semillas y tallos de *Moringa Oleífera Lam*, aprovechando que esta planta posee características coagulantes en la clarificación de aguas de acuerdo a diferentes investigaciones. Para lograrlo se obtuvieron a partir de las semillas y tallos de *Moringa*, seis tipos de adsorbentes; semilla sin cascara calcinada SSCC, semilla sin cascara seca SSCS, semilla con cascara seca SCCS, semilla con cascara calcinada SCCC, tallos calcinados TC y tallos secos TS, además se realizaron pruebas de jarras y se trabajó en el proceso experimental con agua residual domestica e industrial con alto contenido de nutrientes, alcanzándose remociones de 88.71, 90.97 y 98.81% respectivamente en los dos tipos de agua, convirtiéndose en resultados efectivos en comparación con la eficiencia de tecnologías actuales empleadas para el mismo fin, siendo esto último, el objetivo principal de este estudio. Luego del análisis experimental de los resultados, se recurrió a las técnicas de análisis de varianza ANOVA, con la finalidad de obtener un argumento estadístico de los datos, lo cual dejó como conclusión que el tiempo y los tipos de adsorbentes influyen en la remoción de nutrientes.

***Palabras clave:*** adsorbentes, remoción de nutrientes, tratamiento de aguas residuales

### **Asbtract**

In this degree project arose as an alternative treatment for the removal of nitrate and phosphate from waste water by absorbing elaborated from seeds and stems of *Moringa Oleifera* Lam, being useful that this plant possesses coagulating characteristics in the water clarification of agreement to different investigations. To achieve it they were obtained from the seeds and Moringa's stems, six types of adsorbents; seed without calcined rind SSCC, seed without dry rind SSCS, seed with dry rind SCCS, seed with calcined rind SCCC, calcined stems TC and dry stems TS, in addition tests of pitchers were realized and one was employed at the experimental process with residual domestic and industrial water with high place contained of nutrients, being reached Removals of 88.71, 90.97 and 98.81 % respectively in both types of water, turning into effective results in comparison with the efficiency of current technologies used for the same end, being the above mentioned, the principal aim of this study. After the experimental analysis of the results, one resorted to the technologies of analysis of variance ANOVA, with the purpose of obtaining a statistical argument of the information, which stops as conclusion that the time and the types of adsorbents influence the removal of nutrients.

***Keywords:*** *adsorbents, removal of nutrients, wastewater treatment.*

## Contenido

Resumen .....	5
Asbtract .....	6
1. Introducción .....	12
2. Planteamiento del problema .....	15
3. Justificación.....	18
4. Objetivos .....	20
4.1. Objetivo general.....	20
4.2. Objetivos específicos .....	20
5. Marco teórico .....	21
5.1. Conceptos y Teorías.....	21
5.1.1. Adsorción en el tratamiento de aguas. ....	22
5.1.2. Bioadsorción.....	23
5.1.3. Bioadsorbentes. ....	23
5.1.4. Nitrógeno.....	23
5.1.5. Nitrificación. ....	24
5.1.6. Desnitrificación. ....	24
5.1.7. Fosforo. ....	25
5.1.8. Contaminación por nitrógeno.....	25
5.1.9. Contaminación por fosfatos. ....	26

5.2.	Marco Legal .....	27
5.2.1.	Normativa internacional .....	29
5.2.2.	Chile .....	30
5.2.3.	España .....	30
5.2.4.	Francia .....	30
6.	Estado del arte .....	32
6.1.	Aplicación de moringa oleífera en el tratamiento de aguas. ....	36
7.	Metodología .....	42
7.1.	Recolección de las semillas y tallos de moringa oleífera. ....	42
7.2.	Elaboración de los Adsorbentes .....	44
7.3.	Recolección del agua residual .....	45
7.4.	Evaluación de los adsorbentes .....	46
7.5.	Determinación del efecto de la dosis del adsorbente .....	48
7.6.	Análisis de resultados. ....	49
8.	Resultados y discusión .....	51
8.1.	Caracterización de las aguas residuales utilizadas, comparación con las normativas y tipos de adsorbentes. ....	51
8.1.1.	Tipos de adsorbentes en cada una de sus presentaciones .....	55
8.2.	Remoción de fosfatos en el agua residual domestica .....	56
8.3.	Remoción de fosfatos en el agua residual industrial .....	59



8.4.	Remoción de nitratos en agua residual industrial .....	65
8.5.	Efecto de la dosis en la remoción de agua residual industrial .....	67
8.6.	Efecto sobre la concentración de fosfatos.....	67
8.7.	Efecto sobre la concentración de nitratos .....	70
8.8.	Efecto de la dosis de adsorbente en la remoción de fosfatos en el agua residual industrial	71
8.9.	Análisis Estadístico.....	76
8.10.	Análisis de resultados .....	84
9.	Conclusiones .....	88
10.	Recomendaciones.....	90
11.	Referencias .....	92
12.	ANEXOS.....	102

**Lista de tablas y figuras****Tablas**

Tabla 1 Descripción de los adsorbentes obtenidos.....	45
Tabla 2 Adsorbentes con mejores resultados.....	47
Tabla 3 Caracterización inicial de agua residual domestica.....	50
Tabla 4 Concentración inicial de nutrientes en el agua residual domestica.....	51
Tabla 5 Caracterización de agua residual industrial.....	52
Tabla 6 Concentración inicial de nutrientes en el agua residual industrial.....	53
Tabla 7 Caracterización final de agua residual industrial.....	60
Tabla 8 Concentración final de nutrientes en el agua residual industrial.....	73
Tabla 9 Análisis de varianza sobre el agua residual domestica.....	75
Tabla 10 Análisis de varianza sobre el agua residual industrial.....	76
Tabla 11 Análisis de varianza sobre la segunda muestra de agua residual industrial.....	77
Tabla 12 Análisis de varianza sobre la tercera muestra de agua residual industrial.....	78
Tabla 13 Comparación del tratamiento alternativo planteado con otras tecnologías.....	79

**Figuras**

Figura 1 Diagrama de flujo hasta la preparación final del producto.....	41
Figura 2 Ubicación, parcela Mocaná.....	42
Figura 3 Árbol de Moringa.....	42
Figura 4 Aspecto final de seis tipos de adsorbentes.....	55
Figura 5 Resultados de remoción de fosfatos en el agua residual domestica.....	56
Figura 6 Resultados de remoción de fosfatos en el agua residual industrial.....	59
Figura 7 Especiación fraccionada del fosforo en función del pH.....	62

Figura 8 Resultados de remoción de nitratos en el segundo ensayo.....	66
Figura 9 Resultados de remoción de fosfatos en el agua residual industrial para SSCS.....	68
Figura 10 Resultados de remoción de fosfatos en el agua residual industrial para TC.....	69
Figura 11 Resultados de remoción de nitratos en el agua residual industrial para SSCS.....	70
Figura 12 Resultados de remoción de nitratos en el agua residual industrial para TC.....	71
Figura 13 Remoción de fosfatos en el agua residual industrial para SSCS.....	72
Figura 14 Remoción de fosfatos en el agua residual industrial para TC.....	73
Figura 15 Lugar de recolección.....	102
Figura 16 Árboles productores.....	102
Figura 17 Plantas productoras.....	103
Figura 18 Tallos recolectados.....	103
Figura 19 Semillas recolectadas.....	104
Figura 20 Semillas molidas.....	104
Figura 21 Semillas con cascara triturada.....	105
Figura 22 Tallos secos.....	105
Figura 23 Semilla sin cascara, semilla con cascara y tallo seco.....	106
Figura 24 Tipos de adsorbentes.....	106
Figura 25 Prueba de jarra para los adsorbentes.....	107

## 1. Introducción

El fósforo es un elemento vital para la vida, ya que cumple un papel fundamental en procesos biológicos. Además, es un componente sumamente importante para la industria de los fertilizantes, proveniente de la explotación de rocas fosfóricas. La búsqueda de alternativas para remediar los efectos causados por la erosión y mal uso de los suelos sufrida durante el siglo XVII Y XVIII generó dependencia de este nutriente y alteró su ciclo natural cerrado, convirtiéndolo en un proceso lineal, que tiene inicio en las minas de rocas fosfóricas. Se prevé que las reservas naturales de fósforo no serán capaces de proveer el fósforo necesario dentro de 50 años en el ámbito mundial, aunque en la actualidad se mantienen debates sobre estas afirmaciones (García Albacete, 2014).

La contaminación debido a la presencia elevada de fósforo y nitrógeno en las aguas residuales como consecuencia de las actividades productivas del hombre, ha originado diversos impactos negativos sobre el medio ambiente, especialmente cuando es vertida a los cuerpos de agua receptores; lagos, lagunas y ríos (Smith, Tilman, & Nekola, 1999). Aunque los nutrientes son esenciales para la supervivencia de las especies en el agua, las dificultades están asociadas a la excesiva concentración de estos en los ecosistemas acuáticos, causando eutrofización, acidificación y proliferación de algas tóxicas (Camargo & Alonso, 2007).

El fósforo es un elemento que por su ciclo natural, está presente en abundancia en los cuerpos de agua, sumada a esta presencia, existen también fuentes antropogénicas, procedentes de las

actividades agrícolas e industriales, las cantidades excesivas de fosfatos en los cuerpos de agua, tiene como principal efecto dañino, la contribución al crecimiento de algas, generando una demanda excesiva de oxígeno, derivando un desequilibrio ecológico (Saavedra, 2016).

Convirtiéndose en una de las grandes problemáticas ambientales, proveniente en su mayoría de acciones como; el uso de fertilizantes, fosfatos contenidos en aguas residuales domésticas e industriales en los hogares y fábricas, aumentado paralelamente con el crecimiento poblacional (Altamirano, Castellón & Valdivia, 2016), este nutriente contenido en grandes concentraciones en los cuerpos de agua, es causante de fenómenos que afectan los ecosistemas acuáticos, causante de procesos acelerados de eutrofización. (Rivas et al., 2009).

Existen diversos métodos para la remoción de fosfatos que han sido utilizados y optimizados a lo largo de los años, pudiéndose resumir de la siguiente manera: Eliminación biológica de fósforo / filtración, adsorción sobre medios específicos, la osmosis inversa y la precipitación química con sulfato ferroso, cloruro ferroso, el cloruro férrico, el aluminato de sodio, y la cal (Canjura & Lemus, 2003). La coagulación es la tecnología más utilizada y el coagulante que se utiliza con mayor frecuencia, debido a su bajo costo y fácil manejo es el Sulfato de Aluminio,  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  (Restrepo, 2009). Además las características potenciales y contundentes para desestabilizar partículas coloidales, remover nutrientes y de igual forma arrastrar toda clase de impurezas suspendidas o disueltas dentro del agua (Camareno & Esquivel, 2006).

A pesar de los beneficios que genera en el tratamiento de aguas, distintas investigaciones desarrolladas asocian este tipo de coagulante con la enfermedad de Alzheimer (Lédo, Lima, & Paulo, 2009), por lo que se hace necesario incursionar sobre tecnologías diferentes que contemplen facultades similares y no repercutan en la salud humana.

El tratamiento de aguas residuales conforma métodos físicos y químicos, además de los biológicos, los cuales son usados con frecuencia para degradar materia orgánica y nutrientes (Roa-Parra & Cañizares-Villanueva, 2012). Por lo tanto, en este trabajo de grado se desarrolló una técnica alternativa de bajo costo y fácil acceso para la remoción de Nitrógeno y Fosforo presentes en las aguas residuales mediante el uso de adsorbentes a base de tallos y semillas de Moringa Oleífera, aprovechando el poder coagulante sobre la turbiedad (Jadhav & Mahajan, 2012), y la cualidad para adsorber Fosforo de esta última en las aguas servidas (Duarte & Hernández, 2015).

## 2. Planteamiento del problema

El tratamiento para la remoción de nutrientes en las aguas residuales, de mayor utilidad, es la coagulación, mediante Sulfato de Aluminio,  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  gracias a su fácil manejo (Restrepo, 2009). Sin embargo este coagulante está directamente relacionado con la enfermedad Alzheimer (Lédo et al., 2009), además la acumulación de lodos, producto de la sedimentación, causa desventajas ambientales y económicas (Bash, 2015), lo cual hace beneficiosa la nueva técnica planteada, ya que su utilización no está asociada a efectos secundarios que repercutan en la salud humana.

El nitrógeno y el fósforo componen los nutrientes más importantes para el desarrollo y supervivencia de las especies acuáticas, sin embargo, son motivo de preocupación cuando existe un desequilibrio de estos en el agua. Aunque podría suponerse que no causan ninguna afectación en el equilibrio normal de la naturaleza acuática, sí su presencia es insuficiente, ocasionan una limitación en el crecimiento de las plantas acuáticas (Saavedra, 2016).

Por otro lado, la presencia en lagos y ríos de cantidades en exceso de nitratos y fosfatos, provenientes de las actividades antropogénicas interfiere en los procesos fotosintéticos y termina afectando la supervivencia de las especies en el agua. Si este exceso se hace permanente puede desencadenarse el fenómeno de eutrofización (Jiménez, 2001). Este no es el único fenómeno asociado a los nitratos, pues este compuesto también provoca la acidificación de ríos y la proliferación de algas tóxicas (Camargo & Alonso, 2007).

Las fuentes hídricas en Colombia, poseen un alto contenido de fosfatos, originados por las actividades agrícolas, industriales, y domésticas (Roxanna & Marengo, 2013). A pesar de los esfuerzos enfocados hacia el control de la contaminación sobre los vertimientos directos al medio exterior, por medio de la implementación de plantas de tratamiento para aguas residuales PTAR, los cuerpos de agua del país siguen siendo uno de los más afectados por este flagelo en el continente (Segura, 2007).

En el presente existe una amplia gama de métodos y procesos, para la contribución de la descontaminación de las aguas superficiales (Matilainen, Vepsäläinen, & Sillanpää, 2010); entre ellos se encuentra el uso de coagulante o bioabsorbente a base de semillas de *Moringa*, que a diferencia de los coagulantes tradicionales es un material de fácil acceso y de bajo costo (Avelino, Novelo, & Dávila, 2009). La remoción del fósforo en las aguas residuales, está sujeta al método de la precipitación, mediante una serie de productos químicos, entre los que se destacan el sulfato ferroso, el cloruro ferroso, el cloruro férrico, el aluminato de sodio, y la cal (Canjura & Lemus, 2003). Otra opción son los tratamientos biológicos o mediados por microorganismos que absorben fósforo para su crecimiento (Carmona Marzabal, 2015). Al igual que el fósforo, el nitrógeno actúa como un nutriente esencial en algunos microorganismos, es decir se puede remover de forma eficiente a través de procesos biológicos de nitrificación y desnitrificación (Cervantes-Carrillo & Pérez, 2000).



La moringa Oleífera ha sido utilizada en los procesos de tratamiento de agua potable y aguas residuales, ya que actúa como ayudante de coagulación, su éxito se debe a que sus semillas están compuestas por proteínas catiónicas con un alto poder de absorción, que son capaces de eliminar los agentes tóxicos del agua (Landa, Zapata, Flores, & Charcape, 2015). A través de los residuos de Moringa Oleífera, como la cascara y tallos, se han obtenido resultados positivos de remoción y/o absorción de diferentes metales pesados (Ni, Cu y Cd) (Fayos, Arnal y Alandia 2012). Por lo que se prevé que también pueden servir como alternativa para la remoción de nutrientes presentes en los cuerpos de agua, entre ellos los nitratos y fosfatos.

Teniendo en cuenta lo anterior, se formula la siguiente pregunta problema ¿Cuál será la remoción de nitrógeno y fosforo que se puede obtener utilizando las semillas y el tallo de la moringa Oleífera como adsorbente de origen natural? con el fin de aportar soluciones para el equilibrio y supervivencia de los ecosistemas acuático.

### 3. Justificación

La proliferación acelerada de plantas y algas en los lagos, originada por la alta presencia de materia orgánica en el agua, impidiendo la entrada de los rayos del sol a la parte inferior de los cuerpos de agua, se denomina eutrofización, las causas son debido al vertido de elementos compuestos por fosforo y nitrógeno (Fried, Mackie, & Nothwehr, 2003), que provienen normalmente de residuos líquidos urbanos, agrícolas e industriales, provocando efectos negativos en las especies acuáticas (Moreta Pozo, 2008).

En la actualidad las tecnologías implementadas para el tratamiento de aguas residuales son eficientes, especialmente en la eliminación de nutrientes, sus métodos incluyen normalmente materiales fisicoquímicos, químicos-biológicos, y procedimientos biológicos, no obstante la complejidad de la mayoría y sus altos costos operacionales (Milagros & Trujillo, 2012), desencadenan la necesidad de incursionar en investigaciones que permitan descubrir estrategias alternativas que faciliten la remoción de contaminantes en el agua y a su vez sea un proceso económico (Díaz, Alvarado, & Camacho, 2012).

El árbol de moringa se constituye como una gran opción de origen natural para la remoción de nutrientes en el agua, ya que la estructura de sus semillas está compuesta o contiene proteínas solubles cargadas positivamente, que al experimentar contacto con partículas contaminantes presentes en el agua; arcillas, bacterias, toxinas, limo, entre otras, actúan como coagulante permitiendo que los flóculos formados precipiten (Mas y Rubí, Carrasquero, & Martínez, 2013). Las características proteicas asociadas a los residuos vegetales siguen siendo objeto de

investigación por su alto poder antimicrobiano, sus propiedades además tienen facultades de remover hasta un 99.9% de las impurezas en el agua (Landa et al., 2015).

## **4. Objetivos**

### **4.1. Objetivo general**

Desarrollar un tratamiento alternativo para la remoción de nitrógeno y fosforo presentes en las aguas residuales domesticas e industriales mediante el uso de adsorbentes a base de semillas y tallos de Moringa Oleífera.

### **4.2. Objetivos específicos**

Evaluar la capacidad de remoción de los adsorbentes a base de semillas y tallos de Moringa Oleífera en aguas residuales con contenido de nitrógeno y fosforo.

Determinar las condiciones óptimas de trabajo de las semillas y tallos de la Moringa Oleífera como adsorbente de nitrógeno y fosforo en aguas residuales.

Comparar la eficiencia del tratamiento alternativo planteado con actuales tecnologías empleadas para la remoción de nitrógeno y fosforo.

## 5. Marco teórico

### 5.1. Conceptos y Teorías.

La *Moringa* es un árbol originario de la cordillera asiática el Himalaya, se caracteriza por ser parte de la familia monogenérica *Moringaceae*, la mayoría de sus especies se encuentran habitadas en Madagascar y la India, la vida útil de esta planta es corta, debido a que alcanza máximo 20 años; y su altura puede ser hasta de 5 m en un año, su llegada al continente americano se dio, gracias al trueque de plantas que realizaron los españoles con el país de Filipinas. Sin embargo existen referencias que señalan que su estructura se utilizó para alimento en la primera mitad del siglo XIX en las Antillas Francesas y en Cuba (Mora & Gacharná, 2015).

Además de lo anterior, la *Moringa* se caracteriza por poseer un desarrollo acelerado en condiciones óptimas de remojo y nutrientes, incluso experimenta un grado de retoño elevado ante su poda, sus especies tienen la capacidad de reproducirse a través del tronco y semillas, esta planta crece tanto en clima tropical como en subtropical; y la variabilidad de temperaturas que puede ser capaz de soportar esta misma, sin que se afecte su propio crecimiento se estipula entre 12,6 y 40,0 °C, o en su defecto entre -1 °C y 48 °C como temperatura máxima (Godino y Villegas 2012).

Entre otras cosas, las hojas que componen la estructura de esta planta se destacan por estar divididas en varios pinnas, agrupados en cinco pares ubicados encima del peciolo primordial y un folíolo en su trozo final, con una distancia de 30 a 70 cm, con respecto a sus propiedades agrícolas la moringa posee la capacidad de aportar nutrientes en gran proporción al suelo, evitando de esta forma la erosión, la aridez y las elevadas temperaturas (Pérez et al., 2010).

Efectivamente la moringa es una planta a la cual se le atribuyen diferentes propiedades que favorecen no solo al medio ambiente sino también a la salud humana; desde sus potencialidades nutritivas (Mora & Gacharná, 2015), hasta su poder purificador de aguas fluviales y turbias (Bash, 2015); estos beneficios son suministrados por las hojas, tallos, raíces, la flor, el fruto y las semillas (Arábiga & Oeste, 2013).

#### **5.1.1. Adsorción en el tratamiento de aguas.**

La adsorción se produce cuando existe una cohesión entre las moléculas de un sólido(adsorbente) y un fluido (agua residual), este es un procedimiento en el cual se define adsorbato a todo aquel soluto retenido, mientras que la palabra adsorbente hace referencia al solido que por lo general es permeable. La capacidad de adsorción depende de las condiciones naturales del adsorbente y de la sustancia adsorbida, como también del proceso previo al cual ha sido sometido el mismo, otra de las características de la técnica de adsorción tiene que ver con la temperatura; ya que cuando esta aumenta, la rapidez del proceso se comporta de igual forma, pero este decrece a medida que la cantidad adsorbida aumenta, es necesario destacar que, el volumen de adsorción disminuye cuando aumenta la temperatura (Cecilia & Romero, 2012).

### **5.1.2. Bioadsorción.**

La palabra Bioadsorción se ha usado para hacer referencia al fenómeno de atracción masiva de materiales contaminantes, aprovechando las propiedades que tienen algunas biomasas inactivas o muertas para almacenar estos mismos mediante mecanismos de intercambio iónico, interacciones electrostáticas y complejación entre otros (Roxanna & Marengo, 2013).

### **5.1.3. Bioadsorbentes.**

La cascara de naranja ha sido objeto de distintos estudios que tienen como fin identificar su capacidad de adsorción para el atrapamiento de iones  $\text{Cr}^{3+}$  contenidos en bajas concentraciones en disolución acuosa, precisamente una investigación centrada en este tema encontró; que después de este proceso, esta misma posee bajo contenido de cenizas, presenta un alto poder calorífico, y está exenta de cromo y azufre, con lo cual se puede interpretar que este residuo agrícola tiene características bioabsorbente (Villa, 2008).

### **5.1.4. Nitrógeno.**

El nitrógeno (N) es un nutriente fundamental para la cosecha de cultivos, ya que actúa como un fertilizante en los suelos, su fuente principal se encuentra en la atmosfera constituyendo alrededor del 78% del aire en forma de  $\text{N}_2$ , las plantas no pueden obtener  $\text{N}_2$  directamente del aire, por lo que necesitan de la intervención de microorganismos o simbióticos que mediante su fijación suministran y transforman este mismo en compuestos nitrogenados (García, 1996).

#### **5.1.5. Nitrificación.**

Una de las tecnologías o métodos actuales para la eliminación de nitrógeno, se basa en la nitrificación, la cual se lleva a cabo por microorganismos Gram-negativos litoautotróficos y se caracteriza por ser un proceso totalmente aerobio, los flóculos son estructuras que normalmente se forman en los cultivos nitrificantes, pero su estabilidad depende en gran parte de la formación de sustancias expoliméricas, existen dos etapas que componen el procedimiento, como lo es; la oxidación de amonio a nitrito y finalmente la oxidación de nitrito a nitrato (Cervantes-Carrillo & Pérez, 2000).

#### **5.1.6. Desnitrificación.**

A diferencia del método de nitrificación, el de desnitrificación se lleva a cabo en forma anaerobia y por microorganismos heterotróficos, este último puede ser visto como un complemento del primero, ya que consiste en reducir a  $N_2$  el nitrato obtenido como producto final en el anterior procedimiento. Este proceso también se basa en varias etapas; inicialmente se reduce de  $NO_3$  a  $NO_2$ , luego son reducidos el  $NO_2$  a  $NO$  y de  $NO$  a  $N_2O$ , por último sigue reduciendo de  $N_2O$  a  $N_2$  (Cervantes-Carrillo & Pérez, 2000).



### **5.1.7. Fosforo.**

El fósforo es un elemento natural y constituye un 0,01 % (Roxanna & Marengo, 2013), este mismo también es un nutriente fundamental para la conservación de todas las formas de vida; tanto de las plantas, como de los animales y también de los seres humanos, incluso actúa como fertilizante de suelos, sirviendo así como insumo para los agricultores en épocas de cosecha, sin embargo el problema asociado a este elemento se presenta en los organismos acuáticos, cuando se evidencia un exceso de este en el agua, estimulando la proliferación de algas (Service, Iida, & Shock, 2009). Que al terminar su periodo de vida, interfieren en la penetración de los rayos solares, los cuales son esenciales para la supervivencia de las especies acuáticas, porque de esto depende la generación de oxígeno, el cual se ve sometido a un consumo excesivo como consecuencia de la descomposición de algas, compitiendo con los demás organismos que viven en el agua (BM Editores, 2016).

### **5.1.8. Contaminación por nitrógeno.**

Dentro de los principales efectos causados por la contaminación del nitrógeno en sistemas acuáticos: lagos, ríos, humedales, entre otros; se encuentran la eutrofización de aguas dulces y marinas, la acidificación o reducida alcalinidad de ríos, lagos y la toxicidad directa para la vida en los ecosistemas presente en los mismos (Camargo & Alonso, 2007). La eutrofización es uno de los más importantes; este fenómeno se debe al exceso de nutrientes en el cuerpo de agua, directamente relacionado con compuestos nitrogenados. los cuales influyen en el crecimiento acelerado de algas y plantas acuáticas superiores (Haro & Perales, 2015).

El nitrógeno como elemento químico se encuentra tanto en el suelo, el aire y el agua, de manera natural; conforme a su ciclo existe en forma de nitritos y/o nitratos, sin embargo, en la actualidad se pueden encontrar altas concentraciones de nitrógeno, por la alteración generada de la actividad humana. Por lo tanto, se convierte en un peligro latente para la salud humana y animal. Entre las mayores fuentes de contaminación encontramos, el uso de fertilizantes nitrogenados, la disposición de excretas y desechos municipales e industriales (Pacheco, Pat, & Cabrera, 2002). En Colombia, sitio de origen de la investigación, la agricultura, en caso especial; la producción de caña de azúcar, en sus procesos del uso de nutrientes, para mejor rendimiento de los cultivos. Entre otros, el uso de fertilizantes nitrogenados, tiene un aporte alto (73%), en emisiones de gases de efecto invernadero, (GEI); en contrastes con el uso de combustibles fósiles y energía. (Cauca, Andrade, Segura, & Varona, 2015).

#### **5.1.9. Contaminación por fosfatos.**

Los fosfatos y sus compuestos han tomado mucha presencia e importancia en el análisis de los problemas ambientales del presente. Los fosfatos son muy abundantes en la naturaleza, estos constituyen naturalmente las rocas y algunos minerales, además están presentes en el estiércol, residuos urbanos, desechos industriales, detergentes de uso industrial y doméstico; quizás uno de los de mayores aportantes, a la contaminación de las aguas superficiales, (fertilizantes), usados de forma inadecuada en la agricultura. Estos excesos, debido al mal uso o manejo inadecuado de los compuestos fosfatados, contribuyen al crecimiento acelerado de algas y otros organismos, que provocan eutrofización y posterior deterioro de los cuerpos de agua (Lavie, Morábito, Salatino, Bermejillo, & Filippini, 2010).

La incidencia que tienen los fosfatos en la contaminación de las aguas superficiales, se ha incrementado de forma paralela al crecimiento poblacional, y posterior demanda de productos, para el cubrimiento de las necesidades del ser humano. La agricultura a nivel mundial se incrementa, y por la baja calidad e insuficiencia de nutrientes en el suelo, se recurren a métodos de fertilización, la cual en su mayoría de casos es mal utilizada, generando exceso de estos en el mismo, que generan contaminación difusa, llegan a los cuerpos de agua, por medios naturales, como las escorrentías generadas por las lluvias (Mazzucchelli, 2016).

Los altos niveles de fosfatos, son en general causantes de deterioros, tanto para el medio ambiente, como para la salud del ser humano, estos niveles expuestos son acreditados por organizaciones certificadas. Según la organización mundial para la salud (OMS); los límites máximos de seguridad para los fosfatos en el agua para el consumo humano son, de 0.5 mg/l. Otro referente a tener en cuenta, es la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA), donde informa que los límites no deben exceder de 0.1 mg/l.

## **5.2. Marco Legal**

La Constitución Política de Colombia establece en sus artículos 79 y 80 que el estado debe garantizar el derecho de todas las personas a gozar de un ambiente sano y planificar el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, garantizar de manera adecuada el desarrollo sostenible.

En este caso el objeto de estudio es el agua. El estado debe garantizar su calidad para el consumo humano, además regular distintos aspectos, como la clasificación de las aguas por sus características fisicoquímicas, cuales son de control especial, fijar su destino y/o posibles aprovechamientos; con el fin de que estos no se conviertan en focos de contaminación, para lo cual se ejercen controles sobre los vertimientos, que puedan afectar las aguas superficiales o subterráneas, interiores o marinas.

**Resolución 631 de 2015**, (MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE). Por la cual se establece los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones, no aplica vertimientos a aguas marinas y el suelo.

Esta normatividad corresponde a una serie acciones de cumplimiento a todo aquel que lleve a cabo vertimientos a cuerpos de aguas superficiales y alcantarillado público.

**Actividades:** efectuar análisis del agua, realizar balance de materia o masa, caracterización del agua, las cuales se emiten a la autoridad ambiental. Esta misma carece de un valor máximo permisibles para los vertimientos que contienen nitratos y fosfatos generados por las actividades antropogénicas.

**Decreto 3930.** El cual fue modificado por el decreto 4728 de 2010.

Que tiene como objeto, establecer las disposiciones relacionadas con el uso del recurso hídrico, el ordenamiento del recurso hídrico y los vertimientos al recurso hídrico al suelo y a los alcantarillados.

**Decreto-ley 2811 de 1974**, fija el marco regulatorio para el manejo las aguas en cualquiera de sus estados.

**Ley 09 de 1979** código sanitario establece los procedimientos y las medidas para llevar acabo la regulación y control de los vertimientos.

**Decreto 1594 de 1984**, define los límites permisibles para el vertimiento o descarga de residuos líquidos a un cuerpo de agua o alcantarillado. De nitratos y fosfatos en las normativas colombianas, se tiene en cuenta normativas internacionales.

### **5.2.1. Normativa internacional**

Las normativas colombianas, vigentes, citadas en este documento, no establecen límites máximos permisibles, para nitratos y fosfatos, para las aguas residuales vertidas en los cuerpos de agua, producidas por las diversas actividades industriales y/o domésticas. Basados en la importancia de fijar límites máximos permisibles, tomamos con referencias normas vigentes de otras naciones.

### 5.2.2. Chile

**Norma de emisión para la regulación de los contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos en aguas marinas y continentales superficiales** del 30 de mayo de 2000. En la norma mencionada se establecen los límites máximos permisibles para los vertimientos en los cuerpos de agua, por parte de los residuos líquidos generados en las diversas actividades. Destacamos en esta norma un límite máximo permisibles para los nitrógeno total y fosfatos.

### 5.2.3. España

**Decreto foral 12 de 2006 de Navarra.** Esta norma establece los límites máximos permisibles, para los vertimientos de aguas residuales.

Según el decreto, se establece que las aguas contaminadas pre-tratadas o no, podrán ser evacuadas a una red de alcantarillado municipal si cumple simultáneamente los requisitos mencionados y regulados en el mencionado decreto.

### 5.2.4. Francia.

**Norma de vertimiento.** Esta nación en sus decretos para el cuidado y conservación del medio ambiente, establece por medio de su ente regulador (**la Dirección de Prevención de Riesgo y Lucha Contra la Contaminación del Ministerio de Ecología**).

Decreto: actividad en salud, decreto 2685, agricultura decretos 2112-2120-2160, agroalimentación y bebidas decretos 2210-220-2730-2731-2160-2910.

**Reglamento de vertimientos y reúso de aguas residuales n° 33601.** En la cual define los límites máximos permisibles para los vertimientos en cuerpos de aguas y el medio ambiente en general. Fija límites para nitratos.

Los valores de referencia internacionales para fosfatos; se encuentran estipulados en países como Chile y Francia en un rango de 10mg/l respectivamente, mientras que en España se maneja un valor de 20mg/l, por otro lado, en lo concierne a nitratos, Francia establece un límite de 30mg/l, entre tanto Chile y España estipulan un valor permisible de 50mg/l. Colombia no estipula límites de referencia para estos parámetros.

## 6. Estado del arte

Una de las principales preocupaciones para la salud humana deriva de la presencia de nitratos en alimentos y en agua potable, que conllevan a tener efectos tóxicos por la formación endógena de N-nitrocompuestos (efectos cancerígenos, teratogénicos y mutagénicos); en el documento citado se puede apreciar enunciados realizados por la organización mundial para la salud (OMS), sobre los niveles permitidos de nitratos en el agua para el consumo humano va de 30 a 50 mg/l (Infantil et al., 2010).

Destacando, una de las características de la toxicidad del nitrato en enfermedades causadas al ser humano y animales, se presentan una serie de eventualidades, que permitieron dar inicio a la investigación y posterior reconocimiento. Por primera vez se habló y se publicó la intoxicación aguda en ganado vacuno por nitrato. Posterior a este reconocimiento se desencadenan una serie de casos e informes de intoxicaciones en diferentes lugares de mundo; en 1954 se dio la primera notificación de intoxicación por nitratos, el investigador encontró niveles elevados de nitratos (619 y 388 mg/l). Un caso muy alertador se dio en 1996, donde lactantes consumieron leche en polvo preparada con agua que sobrepasaba los límites, estas concentraciones fueron (1200-1300 mg/l), la cual causó la muerte de los lactantes antes de que se les pudiera aplicar terapias (Pacheco-Avila, Pat-Canul, & Cabrera-Sansores, 2002).



Los tratamientos para la eliminación de nutrientes, fosfatados y nitrogenados, en las aguas residuales, son operaciones de gran importancia, para la preservación de los cuerpos de agua, teniendo en cuenta, que existen productos sintéticos de uso masivo con gran contenido de nitratos y fosfatos, los cuales son causantes de muchos problemas ambientales, uno de los más crítico la eutrofización (Milagros & Trujillo, 2012), siendo el fosforo el principal nutriente causante de fenómenos de eutrofización y el nitrógeno como categoría de segundo grado (Rámrez, Restrepo, & Viña, 1997). Por lo tanto, los nutrientes contenidos en las aguas residuales son objeto de diversos estudios; uno de estos y de principal envergadura es la eliminación de los mismos por medio de estructuras vegetales, entre las que se encuentran las semillas de moringa, las cuales han arrojado resultados importantes de remoción de fosforo, algas y SST con un porcentaje de 85.26%, 85.48% y 73.20% respectivamente (Duarte & Hernández, 2015).

El fosforo también ha sido sometido a la técnica de adsorción, pero esta vez utilizando borra de café (BC) y exoesqueleto (EC) como bioabsorbentes, teniendo en cuenta diversas variables como lo son; tiempo de contacto, efecto del pH, dosificación y concentración inicial, observando una capacidad de adsorción de borra de café de 95,06% y de 98,10% para el exoesqueleto de camarón (Roxanna & Marengo, 2013).

Otra de las estructuras vegetales, son las cascaras de Naranja, la cuales se utilizaron como biomasa acompañada de pectina en su composición, pero ésta vez para la adsorción de Cu (II) en el agua, obteniendo un rendimiento de 36,23 mg/g, cabe aclarar que fueron sometidos al mismo proceso el limón y nopal arrojando resultados de absorción 46,95 mg/g y 44,25 mg/g respectivamente (Villanueva & Nelson, 2005). Para la absorción de este elemento también se han utilizado las algas pretratadas (Rhodophyta), evidenciándose mejores resultados de bioadsorción en el rango de pH de 4 y 4,5 (Del et al., 2002).

Actualmente existen diferentes tecnologías para la remoción de fosfatos en aguas residuales, entre las cuales se destacan los métodos de precipitación mediante compuestos químicos que contengan Al, Fe y Ca, el tratamiento biológico y el intercambio iónico (Roxanna & Marengo, 2013). Por otra parte para eliminación de nitrógeno se utiliza la técnica biológica de nitrificación y desnitrificación (Cervantes-Carrillo & Pérez, 2000).

Últimamente otra de las alternativas de tratamiento biológico utilizadas para la eliminación de nutrientes en las aguas residuales, se ha basado en el uso de microalgas; obteniéndose en algunos casos resultados de remoción del 84.11 % y 89.63 % de nitratos y fosfatos respectivamente (Paper & Acosta, 2016).

El tiempo de retención celular (TRS en inglés) es una de las principales dificultades del proceso de remoción conjunta de nitrógeno y fosforo, debido a que influye tanto en las bacterias que eliminan N, así como con las que oxidan P, de ahí parte la dificultad, puesto que para la eliminación de fosforo el TRS debe ser bajo, en cambio para la remoción de Nitrógeno se necesitan altos valores TRS para contribuir en el crecimiento de bacterias nitrificantes (Urcola, 2012).

Una de las estrategias idóneas para combatir este inconveniente, se centra en implementar una cámara aerobia integrada con un soporte inerte que permita el crecimiento de la biomasa con el fin de completar la actividad oportuna de los organismo nitrificantes, aunque algunos estudios señalan que para la remoción individual de nutrientes también se requiere de este tipo de estructuras, recientemente se utilizan biorreactores de membranas parecidos tipo ANA-ANOX-AER, ya que diversas investigaciones afirman que esta técnica permite no solo la remoción conjunta de N y P, sino también de materia orgánica, y se constituye en diferentes fases, por ejemplo; en condiciones anaerobias ANA, las bacterias tienen la capacidad de almacenar P, y así mismo capturan la materia orgánica susceptible de biodegradabilidad, aprovechándola como material de reserva en forma de polihidroxibutirato (PHB) y polihidroxivalerato (PHV), por otra parte en el contexto aeróbico AER, la bacterias se comportan de manera diferente utilizando el PHB y PHV acumulado como fuente de energía para su crecimiento y a su vez absorbiendo P, finalmente en la etapa anòxica ANOX, los nitritos y nitratos son reducidos a su forma gaseosa ( $N_2$ ) por las bacterias nitrificantes (González & Saldarriaga, 2008).

Desde hace décadas, el proceso de fangos activos se ha constituido en un tratamiento tradicional para la eliminación de nitrógeno y fosforo, debido a su sencillez de operación, si bien se sabe, la remoción de nitrógeno necesita de un procedimiento de desnitrificación, en cual se encarga de la eliminación de los nitratos generados a final de la nitrificación, por otra parte para la eliminación de fosforo se pueden utilizar compuestos de hierro o aluminio mediante la técnica de coagulación (Urcola, 2012).

### **6.1. Aplicación de moringa oleífera en el tratamiento de aguas.**

Las semillas de *Moringa oleífera* Lam se caracterizan por contener grandes cantidades de aminoácidos con carga negativa y positiva, capaces de remover los coloides que influyen en la turbiedad y el color del agua (Geoff & John, 1998), además de esto, se ha determinado que las cascarras también actúan como coagulante, lo mismo que ocurre con el aceite presente en las semillas el cual contribuye con la coagulación de las aguas, arrojando resultados de turbidez inicial en el rango de 56 y 451 NTU, y obteniendo una efectividad de remoción mediante este por encima del 87% (Caldera et al., 2010).

El árbol milagroso como se le conoce, no ha sido utilizado solamente como coagulante, también ha servido para desarrollar prácticas de adsorción de cromo hexavalente en aguas residuales (agua sintética) mediante sus residuos vegetales (cascara de la semilla), obteniéndose un grado de eliminación de este metal del 90% (Galindo, Sotto, & Artunduaga, 2015). Con respecto a otros metales pesados (Cahuasquí, 2016), como el Ni, Cu y Cd, se han establecido resultados de adsorción de 82%, 97% y 94% paralelamente (Fayos et al., 2012).

Con base a distintos experimentos realizados en las turbidas aguas que componen a los ríos Nilo Azul y Nilo Blanco, situados en el continente africano, se demostró el alto poder coagulante que poseen las semillas de *Moringa oleífera*, tanto así, que su eficiencia se compara con el sulfato de aluminio (Mora & Gacharná, 2015). Uno de los productos tradicionales y más usados para la coagulación de las aguas (Rodríguez, Muñoz, García, & Fernández, 2005).

Su éxito es debido a que; el 1 % de las semillas están compuestas por proteínas activas que tienen la capacidad de contrarrestar y derribar coloides, y además de incluir proteínas catiónicas solubles en la misma, que actúan con toxicidad sobre agentes patógenos (Mas y Rubí et al., 2013).

Recientemente, expertos de la Universidad Estatal de Pensilvania, coinciden en afirmar que existe una proteína contenida en las semillas con la característica de eliminar y precipitar bacterias; y resaltan a su vez que el rendimiento de estas, es más efectivo cuando las semillas son cosechadas en épocas lluviosas (Diarioecologia.com, 2015).

Teniendo en cuenta la potencialidad coagulante de la *moringa oleífera* en la potabilización, se hizo un estudio utilizando agua cruda sintetizada en un rango de turbiedad entre 7 y 49 NTU, la dosis usada en este proceso fue de valores entre 10 y 20 mg/l, obteniéndose resultados de remoción por debajo e iguales al estipulado por las normas de calidad de agua de Venezuela, la cual lo reglamenta en 5 NTU (Mendoza, Fernández, & Ettiene, 2000).

Por otra parte, en el departamento del Cauca, Colombia; se utilizaron las propiedades flocculantes de las semillas de Moringa para el tratamiento de efluentes procedentes del proceso de beneficio de café, la cual experimentó una turbiedad mayor de 2000 UNT, de igual forma también se usaron para el control de aguas residuales originadas en la actividad del pelado químico de vegetales, con una turbidez de 91,5 UNT. A través de esto se comprobó la efectividad de la semillas incluso por encima del sulfato de aluminio el otro coagulante empleado, debido a que presentaron mayor porcentaje de remoción en ambas muestras analizadas (Alegria, Salamanca, Rojas, & Concha, 2016).

Tan efectiva es esta planta como coagulante, que incluso se compara su eficiencia con coagulantes tradicionales utilizados en el tratamiento de aguas; un estudio realizado en México experimentó una solución a base de *moringa oleífera* y sulfato de aluminio en el proceso de coagulación y comparó los resultados, obteniendo una remoción de turbiedad de 95.60% para el coagulante tradicional, y para el coagulante natural, en este caso una solución de *moringa* en cloruro de sodio, se obtuvo una eliminación de turbidez de 92.03% (Martha, Arreola, Ramón, & Canepa, 2014).

Aunque el Sulfato de Aluminio ofrece condiciones favorables para la tratabilidad de aguas, su desventaja se centra en su valor económico, y por ende no se garantiza su accesibilidad en países en vía de desarrollo con altos índices de pobreza, debido a esto en el mundo se requieren coagulantes de bajo costo para procesos de clarificación; precisamente a raíz de este problema, en Cuba se propuso un producto líquido a base de cotiledones de la semilla de *Moringa Oleífera Lam* que sea estable, preserve su capacidad coagulante y no suministre sustancias al agua que afecten su posterior utilización (Rodríguez et al., 2005).

Colombia no es un país ajeno a esta problemática, y una prueba de ello; son las fuentes hídricas de Villapinzón Cundinamarca, las cuales se ven seriamente afectadas por las descargas de materia orgánica y contaminantes provenientes de industrias aledañas, en donde los procesos de clarificación están a cargo del Sulfato de Aluminio como coagulante, pero este último genera altos costos debido a la dificultad para transportarlo a zonas rurales y marginales de la región, con el fin de dar solución a esta adversidad, la Universidad Libre de Bogotá desarrolló al interior de sus instalaciones un tratamiento de aguas naturales con coagulantes a base de semillas de *moringa oleífera*, obteniendo resultados positivos en remoción de turbiedad (Bash, 2015).

Esta estrategia ha sido objeto de diversos estudios, que se han extendido a lo largo del país, por ejemplo en la ciudad de Pasto, ubicada en departamento de Nariño se realizaron investigaciones con respecto a las semillas de *moringa* en un proceso que implicó varias etapas, mediante el cual se logró demostrar que los extractos de *moringa* son eficientes como coagulantes, ya que presentan remociones similares a las del Sulfato de Aluminio (Gómez. & Salazar., 2016).

Costa Rica también es un país en donde se realizaron diferentes estudios con el fin de encontrar materiales alternativos que puedan ser usados como coagulantes, mediante esto, se logró comprobar que los extractos de semillas de *Moringa oleífera* son eficientes en el caso de aguas con alta turbiedad, y a su vez al usar su ingrediente activo (un polielectrolito orgánico) sirve para clarificar aguas con baja turbidez, cabe aclarar que también existen otros floculantes orgánicos, como lo es el alginato de sodio, el cual es extraído del ácido alginico producido por las algas marinas, por otra parte la extracción de almidones de papa y yuca también poseen dichas características (Camareno & Esquivel, 2006).

Justamente en la Universidad del Zulia de Venezuela, se realizó una investigación con el fin de analizar por qué las semillas de *moringa oleífera* presentan propiedades coagulantes en el tratamiento de aguas, a través de esto se encontró que los aminoácidos; Asp, Glu, His, Arg y Lis contenidos en su estructura posiblemente interactúan con las partículas coloidales asociadas a la alta turbiedad, debido a su naturaleza hidrofílica, causando su posterior remoción (Fer, 2003). Un análisis similar realizó Landa, pero en este caso se identificó que la Pterigospermina presente en la *Moringa* es una proteína antimicrobiana de bajo peso, la cual es soluble en agua, y además posee carga positiva que al estar en contacto con las cargas negativas de los coloides en suspensión provoca su precipitación (Landa et al., 2015).



Finalmente la *Moringa oleífera* ha sido sometida a diversos usos en lo que concierne al tratamiento de aguas, incluso se realizaron experimentos de remoción del antibiótico Ciprofloxacina contenido en agua sintética utilizando esta planta como coagulante natural (Villaseñor-basulto, Juan, y Rojas). Su característica antimicrobiana es innegable, debido a que los extractos de sus semillas afecta significativamente el crecimiento de especies bacterianas del género *Staphylococcus aureus* y *Escherichia coli* (Pérez & Cabrera, 2015).

## 7. Metodología

Para el desarrollo de este trabajo la metodología fue dividida en varias etapas, asociadas a la obtención de los adsorbentes, la recolección y caracterización del agua residual y estudio de los ensayos de adsorción. En la figura 1. se muestra el paso a paso realizado, para la preparación de los adsorbentes a base de semillas y tallos de *Moringa Oleífera Lam.*

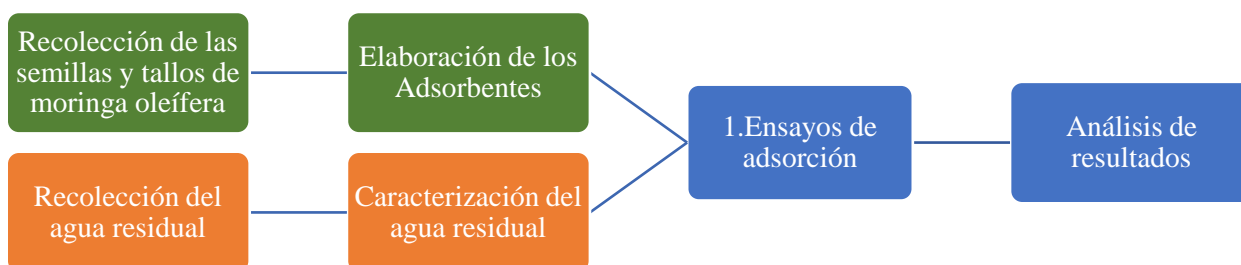


Figura 1. Diagrama de flujo hasta preparación final del producto (elaboración propia).

### 7.1. Recolección de las semillas y tallos de moringa oleífera.

La recolección del material se realizó en la parcela Mocaná, ubicada en el municipio de Galapa Atlántico, en la cual se identificaron las plantas para la recolección de las semillas. Se examinaron 18 árboles adultos, a partir de estos se tomaron 41 vainas que dieron como resultado 700 semillas.

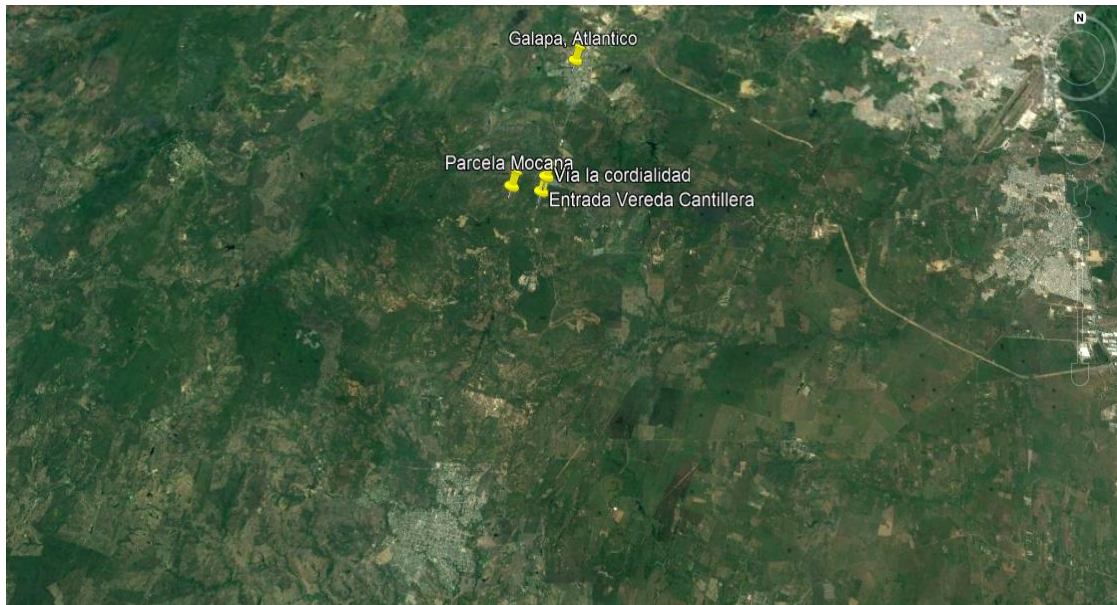


Figura 2. Ubicación, parcela Mocaná (ver figura 14). Fuente: Google Earth, Latitud; 10°51'57.31" N Longitud; 74°54'10.14" O.



Figura 3. Árbol de Moringa. Fuente: elaboración propia. Fecha: 26/09/2016.

La recolección de tallos, se hizo de forma aleatoria en todo el cultivo, el cual cuenta con una edad de 45 días; se tomaron varios tallos en el campo, de un diámetro aproximado de 4.5 cm y una longitud de 48cm, para un peso de 25 g.

## **7.2. Elaboración de los Adsorbentes**

Se sometieron las semillas y tallos de *Moringa Oleífera Lam* a un proceso físico (trituración y secado) con base a métodos descritos por otros autores (Fayos et al., 2012). Previamente los tallos fueron cortados con un cuchillo, hasta ser reducidos a un menor tamaño. Posteriormente, se realizó la trituración de las semillas y tallos de *moringa oleífera Lam* manualmente con un mortero y se secaron los residuos vegetales en un horno a una temperatura de 105°C por un tiempo de 24 horas. Luego del secado los materiales fueron mantenidos en un desecador Brand, el cual contiene una sílice con un indicador de humedad.

El proceso de calcinación se efectuó en una mufla Thermo Scientifica a una temperatura de 550 °C y a un tiempo de 40 minutos. Luego los residuos vegetales fueron triturados nuevamente, hasta obtener tamaños pequeños y finos del adsorbente.

Mediante el proceso descrito anteriormente, se obtuvieron seis tipos de muestra del adsorbente en las siguientes presentaciones:

Semilla sin cascara seca, semilla sin cascara calcinada, semilla con cascara seca, semilla con cascara calcinada, tallo seco y tallo calcinado.

### **7.3. Recolección del agua residual**

El agua residual industrial utilizada, perteneció al sector de fabricación de dispositivos médicos, mientras que la domestica provino de una empresa prestadora de servicios públicos. Las muestras fueron recolectadas por personal técnico de ambas compañías, antes de ingresar a las plantas de tratamiento; luego fueron transportadas en recipientes plásticos estériles, cumpliendo con los requisitos para la manipulación y custodia de la muestra según el reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico ras – 2000, título e, sobre tratamiento de aguas residuales. Por último, se llevaron al laboratorio del Centro de Investigaciones Tecnológicas Ambientales en las instalaciones de la Universidad de la Costa CUC.

Las muestras de agua fueron caracterizadas y los resultados fueron comparados con los límites permisibles que establece la resolución 0631 de 2015 de calidad de vertimientos para una serie de parámetros, en su capítulo VII (Actividades industriales, comerciales o de servicios diferentes a las contempladas en los capítulos V y VI con vertimientos puntuales a los cuerpos de agua superficiales).

Además se tuvieron en cuenta los valores de referencia estipulados por las normativas internacionales de Chile, España y Francia para realizar la respectiva comparación, en el caso de los fosfatos y nitratos, ya que la norma colombiana no establece ningún valor limite (Alcaldía Mayor de Bogota, 2013).

#### **7.4. Evaluación de los adsorbentes**

Para la evaluación de la capacidad de remoción de nitrógeno y fosforo en aguas residuales, se desarrolló la metodología siguiente:

Inicialmente, se tomaron 6 jarras y se adicionaron 500 ml de agua residual doméstica y 1000 mg de cada uno de los adsorbentes en los distintos recipientes. Luego se llevaron a dos floculadores Velp Scientifica a 150 rpm. Una séptima jarra fue sometida al mismo proceso de agitación, manteniéndola libre de adsorbente, con el fin de verificar en el transcurso del ensayo, el comportamiento de los fosfatos y nitratos en el agua.

Se tomaron muestras cada cinco minutos en cada una de las jarras, a fin de medir la concentración de fosfatos.

Posteriormente se analizaron los adsorbentes utilizando agua residual industrial, siguiendo la misma metodología descrita anteriormente. A partir de los resultados obtenidos se definieron los adsorbentes con mejores resultados.

En la Tabla 1, se muestra, el tipo de agua residual y adsorbente utilizado, además se aprecia la cantidad de adsorbente adicionado en el primero y segundo ensayo.

Tabla 1

*Descripción de los adsorbentes obtenidos, dosificación y los tipos de agua residual.*

No.	Tipo de adsorbente	Tipo de agua residual	Cantidad de adsorbente (mg)	Nomenclatura
1	Semilla sin Cascara calcinada			SSCC
2	Semilla con Cascara seca			SCCS
3	Tallos Calcinados	Doméstica		TC
4	Semilla con Cascara calcinada			SCCC
5	Semilla sin Cascara seca			SSCS
6	Tallos secos			TS
8	Semilla sin Cascara calcinada		1000	SSCC
9	Semilla con Cascara seca			SCCS
10	Tallos calcinados	Industrial		TC
11	Semilla con Cascara calcinada			SCCC

12	Semilla sin Cascara seca	SSCS
13	Tallos secos	TS

---

Resultados obtenidos en campo (elaboración propia)

### 7.5. Determinación del efecto de la dosis del adsorbente

Para evaluar el efecto de la dosis de adsorbente sobre la capacidad de remoción se evaluaron los adsorbentes con mejor comportamiento, variando la concentración y manteniendo fijo el tipo de agua. Usando dosis de 500, 1000 y 1500 mg. La tabla 2, muestra el diseño de experimento planteado para los adsorbentes con mejor comportamiento, a lo largo del proceso de adsorción y la nomenclatura de cada ensayo.

Tabla 2

*Adsorbentes con mejores resultados*

Nº	Tipos de Adsorbentes	Tipo de agua residual.	Cantidad de Adsorbente (mg)	Nomenclatura
1	Semilla sin	Industrial	500	SSCS
2	cascara seca		1000	
3			1500	
4	Tallos		500	TC
5	Calcinados		1000	
6			1500	

Resultados obtenidos en campo (elaboración propia).



### 7.6. Análisis de resultados.

Para determinar o calcular la eficiencia de las semillas y tallos de moringa en la remoción de nitratos y fosfatos en las aguas residuales, se tuvo en cuenta la fórmula de porcentaje de remoción descrita a continuación:

$$\% \text{ de remoción} = \frac{(C_0 - C_f)}{C_0} \times 100$$

Donde  $C_0$  es la concentración inicial de fosfatos o nitratos en el agua residual y  $C_f$  es la concentración final de los mismos.

Para la interpretación de los resultados se realizó un estudio estadístico de los diseños de experimentos, mediante el paquete Statgraphics (Moreno, Figueroa, & Hormaza, 2012), utilizando técnicas como el análisis de varianza ANOVA, diagramas de Pareto y gráficos de contorno. Aprovechando que son técnicas estadísticas, que permite identificar los aspectos de mayor importancia en un determinado problema (Sales, 2013), y reflejan las prioridades que se deben tratar, (Doménech Roldán, 2017).

Donde (FV) son las fuentes de las variaciones que puede ser entre grupos que se refiere a los tratamientos y dentro de los grupos denominado error, (SC) es Suma de Cuadrados, (Gl) se refiere a los grados de libertad, (CM) es el Promedio de cuadrados, (F) es la f calculada, (p) es la probabilidad (Calceta, Cristina, & Bravo, 2016).

Posteriormente se realizó una comparación de los resultados obtenidos en este trabajo, con otras investigaciones encaminadas a la remoción de nitratos y fosfatos por múltiples metodologías, teniendo en consideración que en el mercado existen productos para la eliminación de los mismos. Se desarrolló teóricamente un cuadro comparativo con el fin de comprobar la eficiencia de los adsorbentes frente a la de otras tecnologías (observar tabla 13).

## 8. Resultados y discusión

### 8.1. Caracterización de las aguas residuales utilizadas, comparación con las normativas y tipos de adsorbentes.

En la Tabla 3, se aprecian los resultados arrojados, mediante la caracterización realizada al agua residual doméstica, usada para llevar a cabo la presente investigación. Además, se muestran los valores permisibles para cada parámetro, estipulados por la resolución colombiana sobre calidad de vertimientos.

Tabla 3  
*Caracterización inicial del agua residual doméstica.*

Parámetros	Unidades	Resultados	Norma de Colombia
pH	unidades de pH	7.23*	6.00 a 9.00
DBO	mg/L O <sub>2</sub>	236**	90
DQO	mg/L O <sub>2</sub>	414**	180
Temperatura	°C	29	No establece
Conductividad	usm	780	valor de referencia
Salinidad	ppt	0,1	
Sólidos Disueltos	mg/l	120	
Totales			
Oxígeno Disuelto	mg/l	0,26	
Turbiedad	NTU	581	
Cumple con la norma* no cumple con la norma**			

Datos obtenidos en campo (elaboración propia).

En la Tabla 4 se observa la concentración inicial de los nutrientes en el agua residual doméstica, y los valores de referencia de normativas internacionales; Chile, España y Francia, con el fin de verificar el cumplimiento de los fosfatos y nitratos, aprovechando que la norma en Colombia no establece límites permisibles para estos nutrientes.

Tabla 4

*Concentración inicial de nutrientes en el agua residual doméstica.*

<b>Parámetros</b>	<b>Unidades</b>	<b>Resultados</b>	<b>Norma de Chile</b>	<b>Norma de España</b>	<b>Norma de Francia</b>
Nitratos	mg/l	1.63*	50	50	30
Fosfatos	mg/l	147.6**	10	20	10
Cumple con las normativas internacionales*					
No cumple con las normas internacionales**					

Datos obtenidos en campo (elaboración propia).

Los datos presentados en la tabla 3 y 4, reflejan las características del agua residual doméstica con la que se trabajó en este proyecto, permitiendo conocer los parámetros más comunes, relacionándolos a su vez con la normativa de vertimientos de Colombia y apreciando si se cumple o no con los requerimientos exigidos por el ente regulatorio. Siendo así se logró establecer con base a los valores límites referenciados en la resolución 0631 de 2015, que los parámetros más importantes en las aguas residuales, como lo es la DBO y la DQO no cumplen con los requisitos de vertimientos establecidos en el país, lo contrario al pH que si se encuentra dentro del rango estipulado por dicha norma.

Tabla 5

*Caracterización inicial del agua residual industrial.*

<b>Parámetros</b>	<b>Unidades</b>	<b>Resultados</b>	<b>Norma de Colombia</b>
pH	unidades de pH	5,54**	6.00 a 9.00
DBO	mg/L O <sub>2</sub>	205**	90
DQO	mg/L O <sub>2</sub>	761,9**	180
Temperatura	°C	27,1	No establece
Conductividad	usm	100,3	valor de referencia
Salinidad	ppt	0.1	
Solidos Disueltos	mg/l	625	
Totales			
Oxígeno Disuelto	mg/l	0,28	
Turbiedad	NTU	55	
No cumple con la norma**			

---

 Datos obtenidos en campo (elaboración propia).

El otro tipo de agua residual utilizada para la ejecución de ensayos de laboratorio en esta tesis de grado, perteneció al sector industrial. La cual se caracterizó por no presentar un pH entre el rango establecido legalmente debido a su acidez, además de poseer elevadas concentraciones de DBO y DQO al igual que el agua doméstica.

Tabla 6

*Concentración inicial de nutrientes en el agua residual industrial.*

<b>Parámetros</b>	<b>Unidades</b>	<b>Resultados</b>	<b>Norma de Chile</b>	<b>Norma de España</b>	<b>Norma de Francia</b>
Nitratos	mg/l	2.52*	50	50	30
Fosfatos	mg/l	91.2**	10	20	10
Cumple con las normativas internacionales*					
No cumple con las normativas internacionales**					

---

 Datos obtenidos en campo (elaboración propia).

Los parámetros medidos en campo, fueron comparados con la normativa colombiana vigente, y a través de ellos se logró comprobar que las características de los efluentes suministrados para las pruebas de laboratorio contienen elevadas concentraciones de DBO y DQO. Y por ende sobrepasan los límites permitidos establecidos. Analizando lo previo, se evidencia un alto grado de contaminación asociado a la presencia de materia orgánica e inorgánica en el agua residual domestica e industrial.

Finalmente se recurrió a normativas internacionales para poder realizar comparaciones de cumplimiento con respecto a la presencia de los nutrientes, y se encontró tan solo un exceso de fosfatos en los dos tipos de agua residual; tanto en la domestica como en la industrial, mientras que con los nitratos sucedió lo contrario, ya que se evidenció una cantidad mínima de estos. Las aguas residuales analizadas, exceden las concentraciones límites estipuladas por las normas mencionadas, en cuanto a fosfatos.

El Nitrógeno está principalmente en forma orgánica, después se descompone a Amoniac, oxidándose a Nitrito y Nitratos progresivamente, sin embargo, el Nitrógeno Amoniacal se presenta en solución acuosa como  $\text{NH}_4^+$  o  $\text{NH}_3$  dependiendo del pH; menor de 7 predomina el ion  $\text{NH}_3$  y viceversa (Orozco Jaramillo, 2005), experimentalmente se encontraron cantidades mínimas de nitratos en los dos tipos de agua residual usadas, lo cual indica que aparentemente el pH de estas últimas pudo intervenir en las reacciones que dan origen a la presencia del nutriente.

### 8.1.1. Tipos de adsorbentes en cada una de sus presentaciones.

La figura 4 muestra el resultado final de los materiales vegetales, convertidos en adsorbentes; inicialmente se observan los Tallos secos (TS), luego las Semilla sin Cascara seca (SSCS), después las Semilla con Cascara seca (SCCS). Consecutivamente, de igual forma se aprecian las Semilla con Cascara calcinada (SCCC), Semilla sin Cascara calcinada (SSCC) y Tallos calcinados (TC).



Figura 4. Aspecto final de los seis tipos de adsorbentes (elaboración propia).

Para las SCCC se observa un color cenizo, mientras que el resto de adsorbentes calcinados; SSCS y TC aparentan un color negro similar al del carbón. Por su parte los TS y las SSCS muestran un aspecto de color amarillento parecido a del aserrín, por último, en las SCCS predomina el color marrón de la cascara de la semilla.

## 8.2. Remoción de fosfatos en el agua residual domestica

El presente grafico (figura 5) muestra los resultados del rendimiento en la remoción de fosfatos de cada uno de los adsorbentes, compuestos por semillas y tallos de *moringa oleífera* lam en el agua residual domestica estudiada, a una agitación constante de 150rpm.

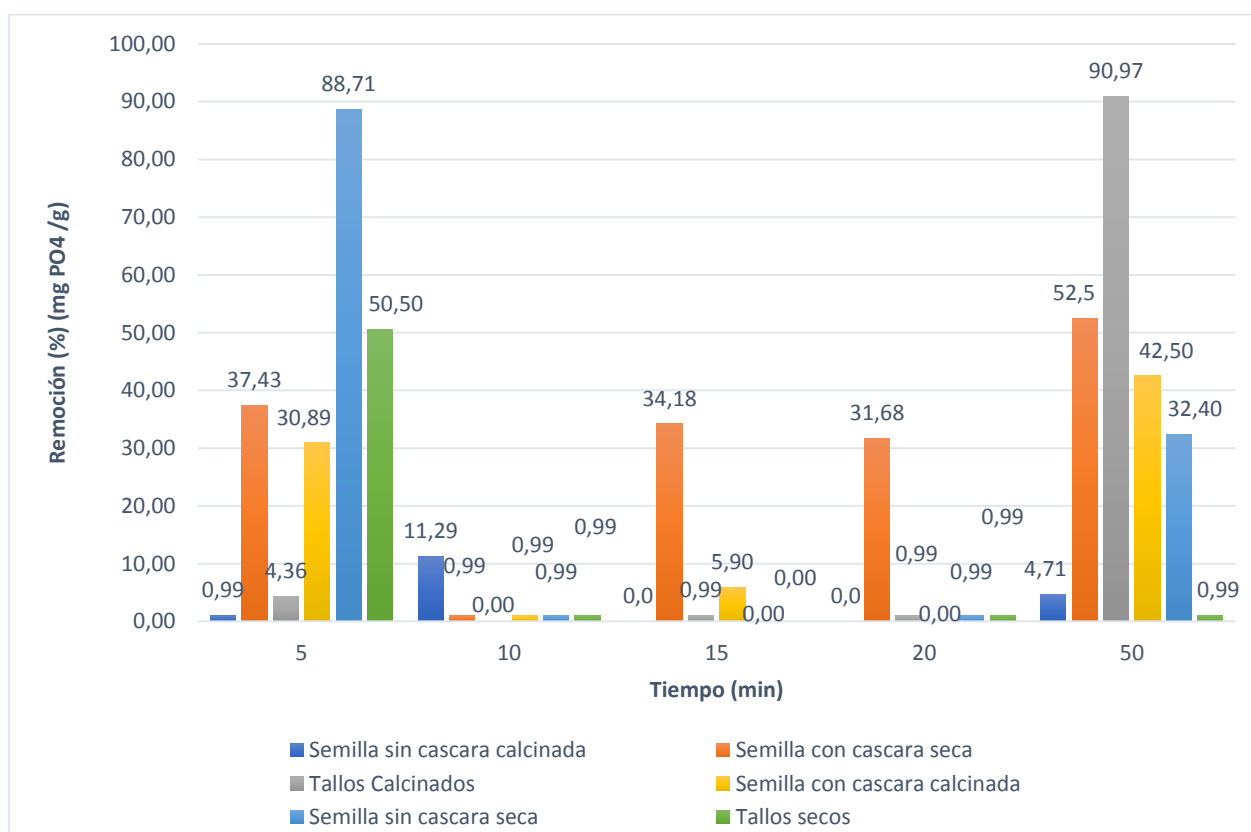


Figura 5. Resultados de remoción de fosfatos en al agua residual domestica (elaboración propia).



Inicialmente a los 5 min del tiempo de experimento, el adsorbente a base de semillas sin cascara seca de ahora en adelante SSCS, experimentó una remoción del 88,71%, mientras que los tallos secos (TS) presentaron una eficiencia del 50,50%. Por otra parte la semilla con cascara seca (SCCS) registró un 37,43% de remoción, un comportamiento similar ocurrió con la semilla con cascara calcinada (SCCC) ya que obtuvieron un rendimiento del 30,89% convirtiéndose en el cuarto adsorbente con mayor efectividad en el proceso, lo contrario sucedió con el tallo calcinado (TC) y la semilla sin cascara calcinada (SSCC) ya que estos tuvieron resultados de 4,36%, y 0,99% cada uno, evidenciándose una menor eficiencia de los mismos en cuanto a la eliminación de nutrientes.

Posteriormente transcurridos 10 min se midió nuevamente la concentración de fosfatos en el agua, obteniéndose en general remociones despreciables, como se puede observar en la gráfica, los resultados fueron: SSCC 11,29%; SCCS, SCCC, SSCS, y TS 0,99% simultáneamente. Por último, los TC presentaron deficiencia considerable en la remoción con un 0,00%. Luego de 15 min se realizó el mismo ejercicio, encontrando únicamente una remoción positiva en las SCCS de 34,18%, ya que la mayoría de adsorbentes como SSCC, SSCS, TS y TC registraron remoción insuficiente de 0,00% y 0,99 % respectivamente, incluso por debajo de la SCCC que reflejó un resultado aceptable de 5,90%.

Para los 20 min de experimento, aunque algunos adsorbentes mejoraron su comportamiento con respecto al anterior tiempo, los resultados también fueron poco significativos en el transcurso del mismo, obteniendo remoción solamente con la SCCS de 31,68%; los restantes SSCC y SCCC obtuvieron un 0,0% mientras que los TC, SSCS y TS un 0,99%.

Finalmente, a los 50 min de transcurrido el ensayo, se evidenció una eficiencia considerable en la remoción con el adsorbente TC con 90,97% y SCCS con un 52,5%. Por otro lado, las SCCC originaron una disminución del 42,50% de concentración de fosfatos en el agua estudiada, siendo el tercer mejor resultado en este intervalo, incluso por encima de las SSCS, las cuales obtuvieron un 32,40% de eficiencia. Para SSCC y 50 minutos se observó un 4,71%, por último, los TS con un 0,99%; los anteriores fueron los únicos adsorbentes que no mejoraron su capacidad de remoción en este espacio de tiempo.

En este caso el mejor tiempo de experimento se observó a los 50min, porque fue en donde se alcanzó la mayor remoción de fosfatos por parte de un adsorbente, como se refleja en la Figura 5.

Teniendo en cuenta el porcentaje de fosfatos eliminado del agua residual doméstica, se comprueba que los TC y las SSCS fueron los adsorbentes más efectivos, porque experimentaron las mejores remociones en momentos distintos (5 y 50min). Y, a pesar de que no conservaron su rendimiento durante el proceso, sí demostraron efectividad en un tiempo específico. Se puede afirmar que las SCCS también presentaron una eliminación importante de fosfatos, pero no tan relevantes como las anteriores.

En un contexto general a excepción de los TS, el resto de adsorbentes analizados; SSCC y SCCC no mostraron resultados eficientes en lo que concierne a la adsorción, ya que experimentaron remociones por debajo del 12 y 43% respectivamente, a lo largo de los tiempos de experimento, siendo resultados poco significativos en comparación al rendimiento del resto de adsorbentes.

### 8.3. Remoción de fosfatos en el agua residual industrial.

En la figura 6, se evaluó nuevamente el rendimiento en la remoción de fosfatos de cada uno de los adsorbentes, esta vez con agua residual industrial y en lapsos de tiempos diferentes.

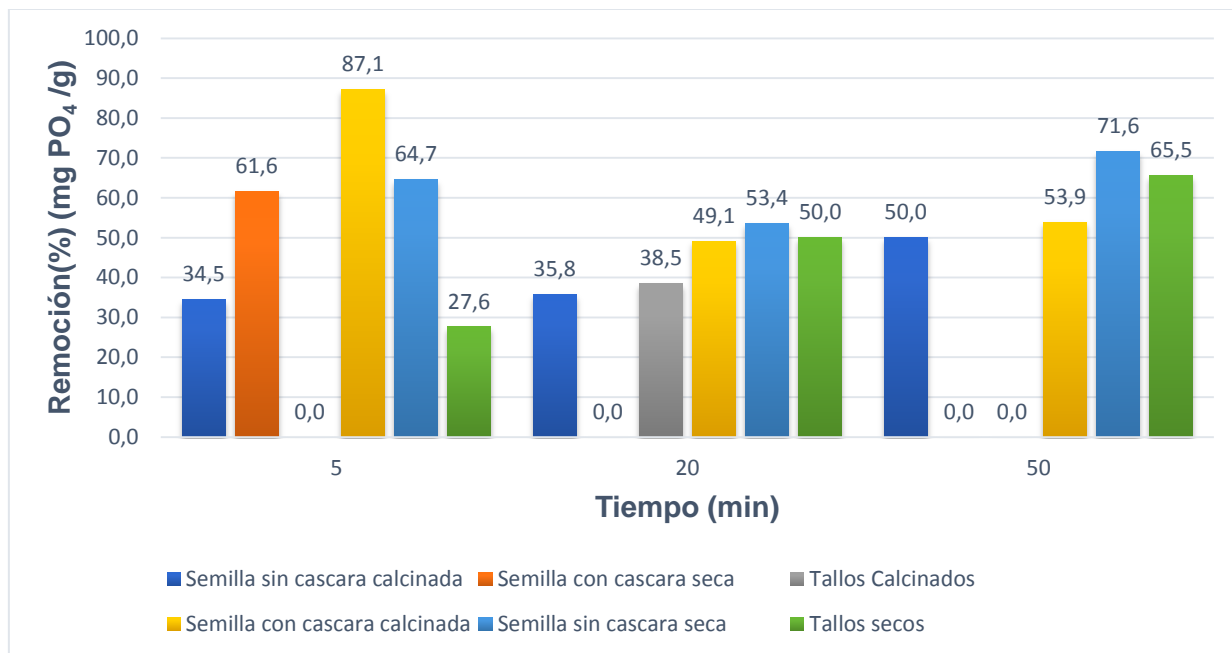


Figura 6. Resultados de remoción de fosfatos en el agua residual industrial (elaboración propia).

Se puede observar que el adsorbente a base de SSCC a los 5min, establece un porcentaje de remoción de 34,5%. Más de la mitad de lo que removieron las SCCS, con un 61,6%; la mejor adsorción en este espacio de tiempo fue la de las SCCC con un 87,1%; seguidas de las SSCS las cuales experimentaron un 64,7% de efectividad, los TC por su parte presentaron una deficiencia absoluta de 0,0%. Mientras que los TS obtuvieron 27,6% de eficiencia en la eliminación de fosfatos en el agua.

En la medición realizada a los 20 min de experimento, se encontraron remociones de 35,8; 38,5; 49,1; 53,4 y 50,0% por parte de las SSCC; TC; SCCC; SSCS y TS respectivamente, mientras que las SCCS no presentaron adsorción.

En los 50 min de transcurrido el ensayo, se notó el cambio en la capacidad de remoción de los adsorbentes, especialmente en las SSCS con 71,6%, siendo la mayor efectividad en este tiempo. Por encima de los TS con 65,5%; el tercer mejor rendimiento lo experimentaron las SCCC con 53,9% mientras que las SSCC 50,0%, los otros dos (SCCS y TC) no registraron remoción.

Tabla 7

*Caracterización final del agua residual industrial.*

ADSORBENTES		SSCC	SCCS	TC	SCCC	SSCS	TS	BLANCO
PARAMETROS	DBO (mg/L O <sub>2</sub> )	108**	243**	70*	81*	302**	243**	91**
	DQO (mg/L O <sub>2</sub> )	592,8**	765**	334,6**	297,7**	750,9**	553**	316,1**
	pH (unidades de pH)	7,58*	7,26*	11,03**	8,68*	7,2*	7,2*	7,38*
	OD (mg/l)	2,26	2,53	2,48	2,57	2,36	2,5	2,59
	TDS (mg/l)	0,2535	0,1171	1,229	0,2801	0,148	0,12	0,0591
	SALINIDAD (ppt)	0,2	0,1	1	0,2	0,1		0
	TEMPERATURA (°C)	22	20	19,8				
	TURBIEDAD (NTU)	55,6	71,6	97,8	83,5	137	184	55,4
	CONDUCTIVIDAD (usm)	371,1	16,6	1,701	3,888	206	154	0

Cumple con la norma de Colombia\* (observar tabla 6).

No cumple con la norma de Colombia\*\* (observar tabla 6).

Datos obtenidos en campo (elaboración propia).

En la Tabla 7, se presentan los datos obtenidos mediante la caracterización realizada al agua residual industrial luego de finalizado el proceso de adsorción, apreciándose el comportamiento de los parámetros más comunes del agua estudiada.

Se refleja un cambio en el pH con respecto al inicial (5,54 ver tabla 6) y se prevé que sucede debido a la adición de los adsorbentes (Landa et al., 2015), dicho cambio de pH puede afectar la concentración de fosfatos en el agua. Los fosfatos presentes en el agua se componen de ortofosfatos y polifosfatos; en general pueden encontrarse en forma de disolución o en partículas granuladas, siendo esta última entre un 5-15 % del total. Entre un 15-35 % del total disuelto, está compuesto por ortofosfatos y el resto de la composición experimenta la presencia de los polifosfatos entre un 65-85 %. Siendo así, se puede argumentar que el total del fósforo en las aguas residuales pertenece a la suma del fósforo disuelto, ya sea orgánico e inorgánico, además del que se encuentra como partículas en suspensión (Huitrón, 2009). Las especies de fósforo son sensibles a los cambios de pH, dependiendo de la acidez y basicidad, se encontrarán diferentes formas de fósforo en el agua residual, como se muestra en la figura 7:

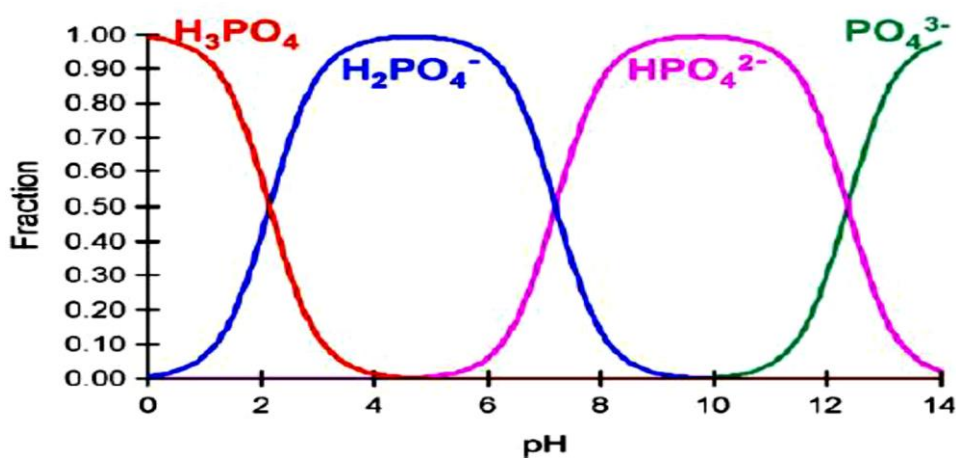


Figura 7. Especiación fraccionada del fósforo en función del pH (Hong et al, 2008).

Para otros adsorbentes, se ha demostrado un efecto del pH sobre la capacidad de remoción, utilizando zeolita modificada (L. G. Hernández-Bárcenas, M. S. Berber-Mendoza, 2017), encontraron que el pH de 9, es el que mayor beneficia la adsorción; porque predomina el ion  $\text{HPO}_4^{2-}$  mientras que a pH de 5 y 6 existe la presencia de  $\text{H}_2\text{PO}_4$ . Asimismo, estudiaron el efecto de la temperatura y establecieron que al aumentar la misma (entre 13 y 35 °C) también incrementó el rendimiento de la adsorción (Landa et al., 2015).

Al parecer hay un efecto considerable de las propiedades acido-base de los adsorbentes sobre la capacidad de adsorción en el agua, porque se encontró una remoción de 87.1 %, para el adsorbente SCCC, que generó un cambio en el pH del agua residual llevándolo hasta 8,68.

La influencia del pH con respecto a la remoción de fosfatos de cada uno de los adsorbentes: en las SSCC se observó un pH de 7,58 para una remoción de 34,5; 35,8 y 50,0% en tiempos de 5, 10 y 50 min respectivamente, asimismo con las SCCC se obtuvo un rendimiento del 87,1; 49,1 y 53,9% pero con un pH de 8,68. Los tres tiempos de medición fueron constantes a lo largo del experimento, con un pH de 7,2 las SSCS presentaron remociones del 64,7; 53,4 y 71,6, por su parte los TS con igual pH, determinaron su eficiencia en un 27,6; 50,0 y 65,5. Mientras que para un pH similar (7,26), las SCCS solo tuvieron efectividad en un tiempo de 5min, la cual fue de 61,6%.

Las semillas de *moringa oleífera* contienen proteínas catiónicas solubles, las cuales se caracterizan por presentar citotoxicidad sobre helmintos, hemoflagelados, bacterias y virus. Además, el 1% del contenido proteico posee la capacidad de neutralizar y precipitar coloides del agua (Mas y Rubí et al., 2013), estos mismos son de origen orgánico e inorgánico, posiblemente por estos dos factores la demanda bioquímica de oxígeno tiende a variar, ya que al removerse los microorganismos y al sedimentarse los coloides se disminuirá la carga orgánica e inorgánica en el agua y por ende esto causaría una variación en la DBO. Al inicio del experimento la DBO<sub>5</sub> fue 205 mg/L O<sub>2</sub> como lo muestra la tabla 5, luego de la adición de los adsorbentes se comportó de forma diferente; SSCC 108, SCCS 243, TC 70, SCCC 81, SSCS 302 y TS 243 mg/L O<sub>2</sub> respectivamente (ver tabla 7). Evidentemente se nota una disminución de la DBO final con respecto a la inicial, en las SSCC y SCCC, mientras que para el resto hubo un aumento de la misma.

Los resultados finales de la caracterización del agua residual industrial, demuestran un cumplimiento en la estabilidad del pH, en cada una de las jarras, estipulado de 6.00 a 9.00, luego de estar en contacto con un adsorbente en específico, a excepción de los TC; los cuales, si lograron alterar el valor de referencia, teniendo en cuenta la normativa colombiana de calidad de vertimientos.



El efluente al entrar en contacto con los adsorbentes reduce la concentración de la DQO en la mayoría de las jarras, sin embargo, no alcanza a cumplir con el valor permisible; 180 mg/L O<sub>2</sub>. La DBO por su parte si cumple con los requisitos legales, cuando el agua entra en contacto con los TC y las SCCC, experimenta valores de 70 y 81 mg/L O<sub>2</sub> respectivamente, es decir por debajo del límite permitido; 90 mg/L O<sub>2</sub>. Las SSCC disminuyen notablemente la concentración de este parámetro, en cambio con el resto de adsorbentes (SCCS y TS), aumenta.

#### **8.4. Remoción de nitratos en agua residual industrial**

Al igual que el agua residual doméstica, el agua residual industrial estudiada tampoco contenía presencia considerable de nitratos, sin embargo, en este caso se evaluaron los adsorbentes con el fin de determinar la efectividad de remoción frente a ese porcentaje mínimo del nutriente en el agua.

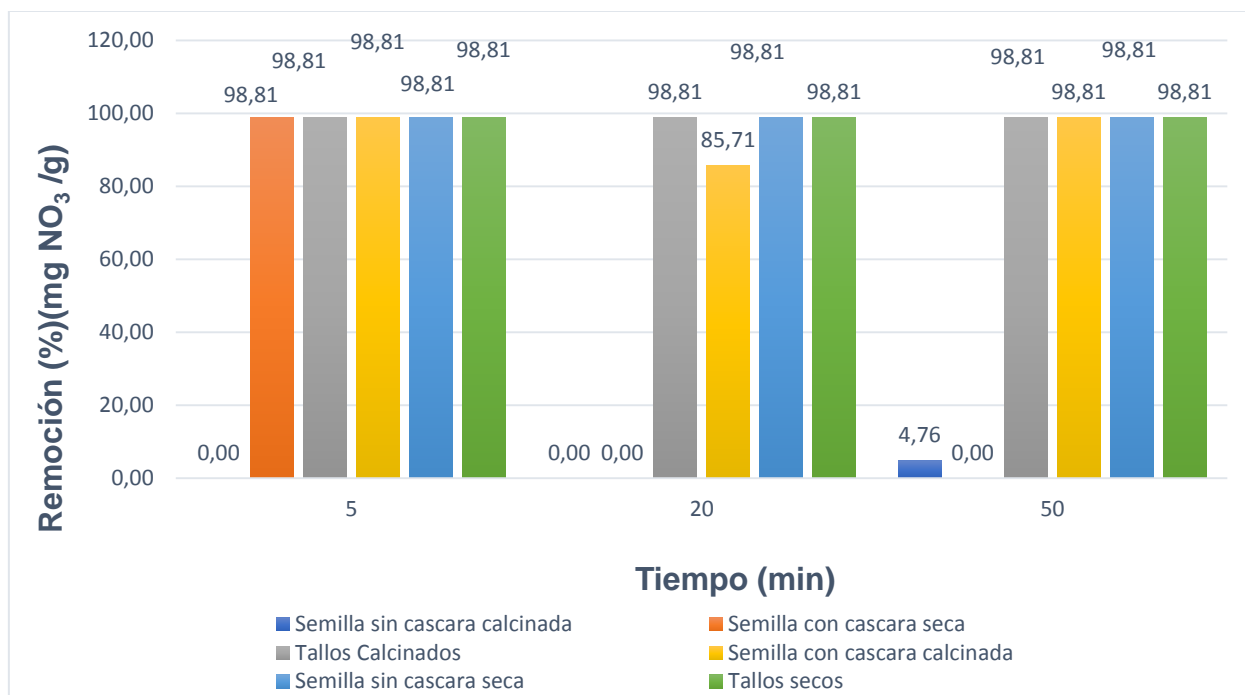


Figura 8. Resultados de remoción de nitratos en el segundo ensayo (elaboración propia).

Encontrando resultados positivos en la mayoría de adsorbentes como se aprecia en la figura 8. A excepción de las SSCC, el cual no obtuvo remoción, todos los adsorbentes (SCCS, TC, SCCC, SSCS y TS) experimentaron remociones de 98,81% en un tiempo de 5min. 15 minutos después se realizó otra medición para verificar la presencia de nitratos, y por medio de ello, se encontró que en tres tipos de adsorbentes se mantuvieron las mismas remociones anteriores, como lo fueron; los TC, SSCS y TS. Solo varió la remoción en las SCCC con 85,71% de rendimiento, mientras que las SCCS y nuevamente las SSCC no registraron adsorción.

### **8.5. Efecto de la dosis en la remoción de agua residual industrial**

Se observó que los absorbentes SSCS y TC fueron los de mayor eficiencia para la remoción de nutrientes. Los absorbentes mencionados mostraron las máximas remociones de fosfatos en el agua residual doméstica, como se aprecia en la figura 5 y aunque no mantuvieron el mismo rendimiento en el agua residual industrial, se tuvo en cuenta que ningún otro adsorbente alcanzó o sobrepasó los niveles de eficiencia arrojados en los resultados (ver figura 6). Sin embargo, para la remoción de nitratos volvieron a demostrar efectividad considerable.

### **8.6. Efecto sobre la concentración de fosfatos**

Inicialmente la concentración de fosfatos del agua residual industrial usada para el proceso, fue de 100,2 mg/l. Al final del mismo, se notó un aumento en la concentración en la mayoría de los resultados, como se puede observar en la figura 9 y 10, en donde se resaltan los datos, de acuerdo a cada dosis de adsorbente.

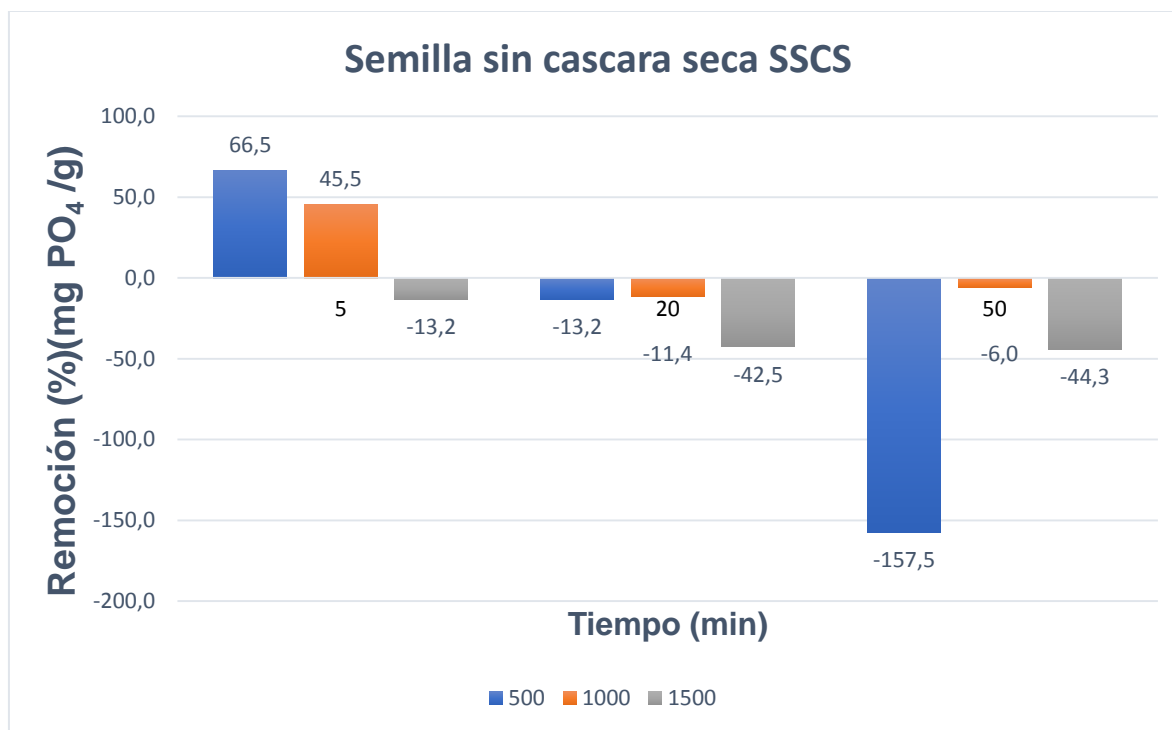


Figura 9. Resultados de remoción de fosfatos en el agua residual industrial después de estar en contacto con el adsorbente de SSCS (elaboración propia).

Evidentemente a excepción de dos resultados registrados a los 5 min de experimento, 33,6 y 54,6mg/L, cuando las dosis del adsorbente a base de SSCS fueron de 500 y 1000 mg, respectivamente, la concentración de fosfatos aumentó con respecto a la inicial como lo muestra la figura 9 Siendo 113,4 la otra concentración a los 1500mg en este tiempo. Se observa además que a los 20min de transcurrido el ensayo las concentraciones fueron de 113,4, 111,6 y 142,8 mg/L respectivamente con las dosis mencionadas, mientras que a los 50min mostraron 258, 106,2 y 144, 6 mg/L.

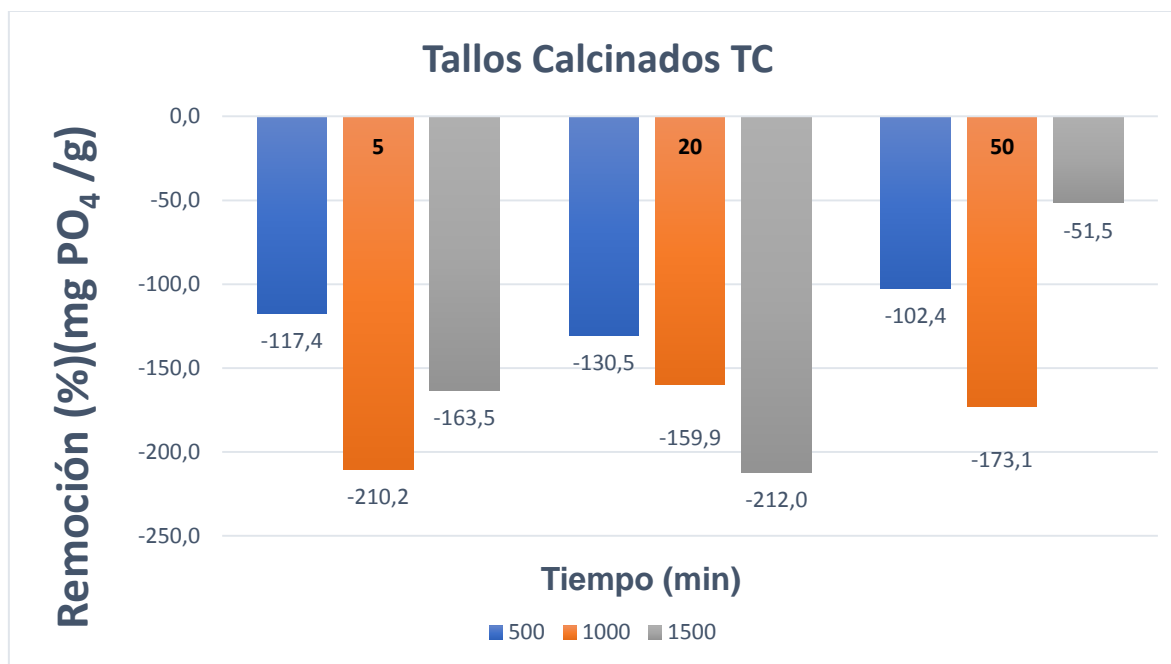


Figura 10. Resultados de remoción de fosfatos en el agua residual industrial después de estar en contacto con el adsorbente TC (elaboración propia).

En la figura 10 se aprecian las concentraciones finales de fosfatos después de experimentar contacto con los TC. Considerablemente estas aumentaron en todos los tiempos y dosis definidas, como se demuestra previamente, para 5min fueron; 217,8, 310,8 y 264 mg/L paralelamente, en los 20min los resultados fueron crecientes debido a que en la primera medición se evidenció un valor de 231 luego 260,4 y por último 312,6 mg/L. Finalmente a los 50min se evidenció en las tres concentraciones ascendencia y descendencia como lo reflejan los valores arrojados; 202,8, 273, 6 y 151 mg/L.

### 8.7. Efecto sobre la concentración de nitratos

Para los nitratos en el agua residual industrial se registró una concentración inicial de 0,12 mg/l, la cual experimentó cambios después de realizado el proceso como se evidencia en la figura 11 y 12: a pesar de ello se descartó evaluar el efecto de la dosis, porque la concentración de este nutriente no fue cuantitativa.

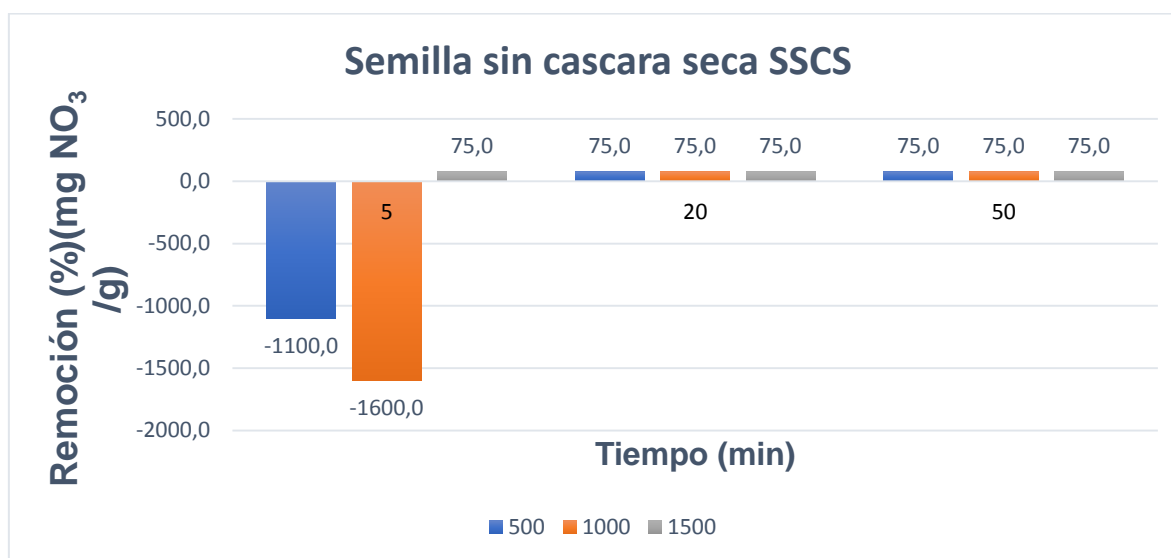


Figura 11. Remoción de los nitratos en el agua residual industrial después de estar en contacto con el adsorbente SSCS (elaboración propia).

A los 5min las SSCS aparentemente incidieron en la concentración de nitratos ya que se apreció un aumento notable de esta, teniendo en cuenta la inicial, debido a que fue de 1,44 y 2,04mg/L a una dosis de 500 y 1000mg respectivamente. En el resto de mediciones el fotómetro no arrojó ningún valor porque no existía presencia de nitratos en el agua, por lo que se recurrió al límite de detención, 0,03mg N-NO<sub>3</sub>-/L (Rodriguez, 2015); es decir, hubo una disminución absoluta en la concentración del nutriente. Lo mismo sucedió con los TC, a diferencia de que en este caso abarcó el total de mediciones como se refleja en la figura 13, lo cual confirma la eficiencia de los adsorbentes.

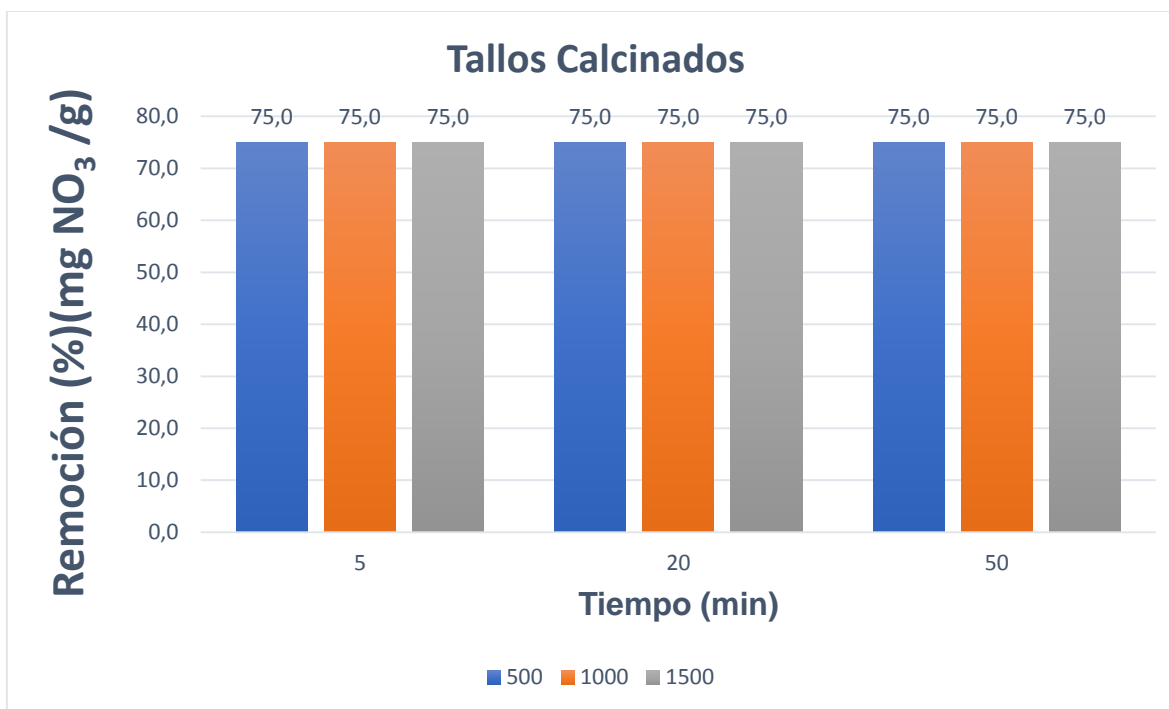


Figura 12. Resultados de remoción de los nitratos en el agua residual industrial después de estar en contacto con el adsorbente de TC (elaboración propia).

#### 8.8. Efecto de la dosis de adsorbente en la remoción de fosfatos en el agua residual industrial

En el último procedimiento de laboratorio, solo se evaluó la posible incidencia de los adsorbentes en la concentración de fosfatos, porque el agua residual industrial utilizada no contenía presencia significativa de nitratos.

Los resultados se observan en las posteriores figuras 13 y 14:

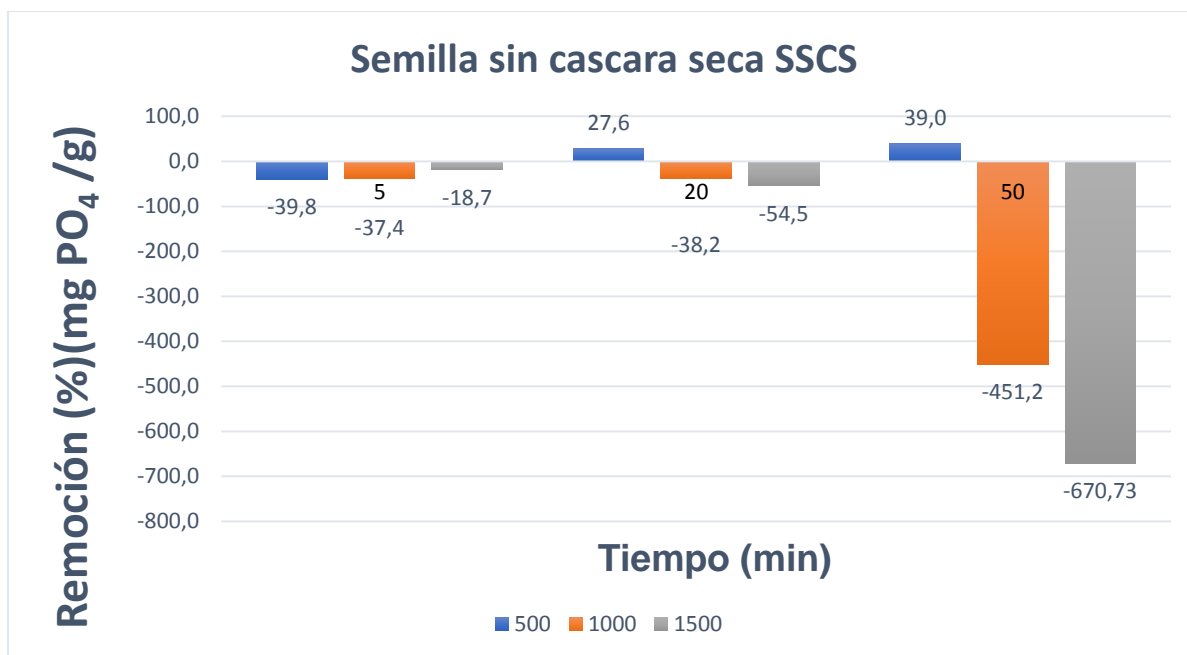


Figura 13. Resultados de remoción de los fosfatos en el agua residual industrial para SSCS (elaboración propia).

En esta oportunidad la concentración inicial de fosfatos en el agua residual industrial fue de 73,8mg/L, la cual disminuyó al tener contacto con las SSCS en tiempos distintos; 53,4 en 20 y 45mg/l en 50 min respectivamente, pero con la misma dosis de adsorbente; 500 mg.

A los 5 min solo existió aumento en las concentraciones con valores de 103,2,101,4 y 87,6 mg/L. Por su parte los resultados restantes en el tiempo de 20min de experimento fueron de 102 y 114mg/L siendo 1000 y 1500 los miligramos de adsorbente usados, mientras que a los 50min se registraron las más elevadas de todo el proceso con 406,8 y 568,8mg/L en las mismas dosis mencionadas.



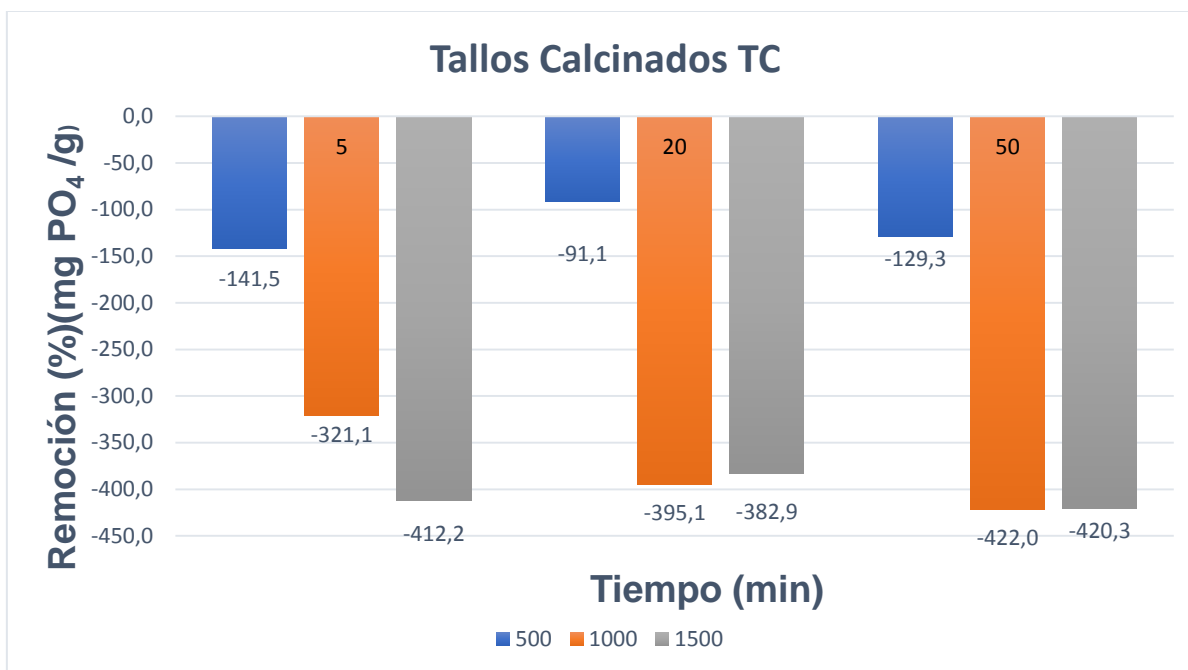


Figura 14. Resultados de remoción de los fosfatos en el agua residual industrial para TC (elaboración propia).

Finalmente, con el adsorbente de TC a los 5min de experiencia, las concentraciones aumentaron ascendentemente observándose resultados de 178,2, 310,8 y 378mg/L recíprocamente con la dosificación ya conocida. Mas adelante a los 20min de ensayo se evidenciaron valores de concentración de 141, 365,4 y 356,4mg/L, por último, los resultados fueron de 169,2, 385,2 y 384mg/L en un tiempo de 50 min.

Los adsorbentes actúan con eficiencia a ciertas dosificaciones y en un tiempo específico. También se puede entender que la metodología de procesamiento del material que se utilizó pudo influir en los resultados, porque por medio de esta supuestamente se liberaron nitratos y fosfatos contenidos en las semillas y tallos originales (observar la sección análisis y resultados).

Tabla 8

*Concentración final de nutrientes en el agua residual industrial.*

<b>Adsorbente</b>	<b>Concentración final de Fosfatos (mg/l)</b>	<b>Concentración final de Nitratos (mg/l)</b>	<b>N° de ensayo</b>
SSCS	113,4**	0,03*	Tercer ensayo
	142,8**	0,03*	
	144,6**	0,03*	
TC	264**	0,03*	
	312,6**	0,03*	
	151,8**	0,03*	
SSCS	87,6**	No se realizó	Cuarto ensayo
	114**	medición	
	568,8**		
TC	378**		
	356,4**		
	384**		

Cumple con las normas internacionales\* (observar tabla 7)

No cumple con las normas internacionales\*\* (observar tabla 7)

Datos obtenidos en campo (elaboración propia).

En la tabla 8 se presentan los resultados finales de concentración de nitratos y fosfatos, luego de haber experimentado contacto con los adsorbentes a base de SSCS y de TC. En el cuarto ensayo no se realizó medición por la cantidad mínima de nitratos, porque los procesos productivos de la empresa que suministro la muestra de agua, no influyen significativamente en la presencia del nutriente.

A excepción de las concentraciones de nitratos, el resto de resultados perteneciente a los fosfatos, no cumplen con los requerimientos internacionales en lo que concierne a presencia límite de nutrientes. Se prevé que los métodos a los que fueron expuestos los materiales vegetales que dan origen a los adsorbentes, pudieron influir en la concentración de fosfatos en el agua residual industrial. En la sección de análisis de resultados se argumenta con mayor claridad las posibles causas, por las cuales los adsorbentes afectaron el proceso.

### 8.9. Análisis Estadístico

En la tabla 9 se presentan los datos arrojados al implementar la prueba estadística del análisis de varianza ANOVA, mediante el paquete Statgraphics, sobre los resultados de remoción de fosfatos en el agua residual domestica e industrial.

*Tabla 9*

*Análisis de varianza sobre los resultados de remoción de fosfatos en el agua residual doméstica.*

<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>GI</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p</b>
Tratamientos	9618,14	9	1068,68	2,11	0,0791
Tiempo	7150,09	4	1787,52	3,53	0,0247*
Tipos de Adsorbentes	2468,05	5	493,61	0,97	0,4575
Error	10138,35	20	506,92		
Total	19756,50	29			

\*Indica una diferencia significativa al 95 % ( $p < 0,05$ )

Datos estadísticos (elaboración propia).

Cuando la probabilidad  $p$ , es menor de 0,05; existe una alta diferencia significativa al 95 % (Fernando & Quintero, 2017). El análisis de varianza para la remoción de fosfatos, determinó que el tiempo influyó en forma altamente significativa ( $p < 0.05$ ) en la remoción del nutriente.

Tabla 10

*Análisis de varianza sobre los resultados de remoción de Fosfatos en el agua residual industrial.*

<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>Gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p</b>
Tratamientos	6965,13	7	995,02	1,91	0,1703
Tiempo	209,09	2	104,54	0,20	0,8213
Tipos de Adsorbentes	6756,04	5	1351,21	2,59	0,0936
Error	5208,06	10	520,81		
Total	12173,19	17			

\*Indica una diferencia significativa al 95 % ( $p < 0,05$ )

Datos estadísticos (elaboración propia).

En la tabla 10 se presenta la aplicación del análisis de varianza (ANOVA) sobre los resultados de remoción en el agua residual industrial, se encontró que los tratamientos, tiempo y los tipos de adsorbentes ( $p > 0,05$ ) no causan un efecto significativo en el porcentaje de remoción de fosfatos y nitratos. También se determinó aplicando la prueba de Kruskal Wallis, que no se puede indicar cuál es el mejor adsorbente.

Tabla 11

*Análisis de varianza sobre los resultados de remoción de fosfatos en la segunda muestra de agua residual industrial.*

<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>Gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p</b>
Tratamientos	85756,34	7	12250,91	3,01	0,0562
Tipos de Adsorbentes	82816,88	5	16563,38	4,07	0,0283*
Tiempo	2939,45	2	1469,73	0,36	0,7058
Error	40734,55	10	4073,45		
Total	126490,88	17			

\*Indica una diferencia significativa al 95 % ( $p < 0,05$ )

---

Datos estadísticos (elaboración propia).

El análisis de varianza para la remoción de fosfatos y nitratos en el tercer ensayo, determinó que los tipos de adsorbentes influyeron significativamente ( $p < 0.05$ ) causando que los porcentajes de remoción de los nutrientes sean diferentes.

Tabla 12

*Análisis de varianza sobre los resultados de remoción de Fosfatos en la tercera muestra de agua residual industrial.*

<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>Gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p</b>
Tratamiento	509218,26	7	72745,47	2,81	0,0676
Tipos de Adsorbentes	374161,21	5	74832,24	2,89	0,0720
Tiempo	135057,04	2	67528,52	2,61	0,1225
Error	258816,90	10	25881,69		
Total	768035,16	17			

\*Indica una diferencia significativa al 95 % ( $p < 0,05$ )

---

Datos estadísticos (elaboración propia).

Por último, según ANOVA el tratamiento, los tipos de adsorbentes y el tiempo son las variables que no afectan el porcentaje de remoción de fosfato en el cuarto ensayo.

Tabla 13

*Comparación del tratamiento alternativo planteado con otras tecnologías.*

Tecnología de Tratamiento Utilizada.	Eficiencia de remoción		Referencias
	<div>(%)</div>		
	Nitrógeno	Fosforo	
Semilla sin cascara seca	98,81	88,71	----
Tallos Calcinados	98,81	90,97	----
Tratamiento de efluentes del cultivo de Litopenaeus vannamei	70,2	53,6	(Ramos et al. 2010)
Biorremediación de aguas con Fosfatos y Nitratos	60	47	(Roa-Parra y
utilizando Scenedesmus incrassatulus inmovilizado			Cañizares-Villanueva
			2012)
Estudios de tratabilidad de agua residual industrial utilizando tecnología de	80	90	(Marcela y
membranas			Rodríguez 2015)
“Remoción de Fósforo en aguas residuales por el método de floculación y		81,84 y	(Saavedra 2016)
sedimentación utilizando cal artesanal y alumbre - kollpa”		66,66	
Evaluación de un sistema biofiltro humedal de remoción de Nitrato de material	80		(Alemendas et al.
fijo inerte de flujo vertical ascendente a escala de laboratorio			2017)



Evaluación de la eficiencia en remoción de nitrato en un humedal construido a escala de laboratorio	85		(Alemendas et al. 2017)
Desarrollo de un tratamiento de aguas residuales con microalgas para la recuperación de nutrientes en Ecuador	53	74	(Espinosa 2016)
“Remoción de nutrientes con Eichhornia Crassipes para reducir la eutrofización en el humedal del Parque Ecológico Municipal Laguna El Mirador en Ventanilla – Callao 2016”	32,02 A 64,32	39,20 A 77,76	(Ney 2015)
Uso de chlorella sp. y scenedesmus sp. en la remoción de Nitrógeno, Fósforo y DQO de aguas residuales urbanas de Maracaibo, Venezuela	70	30	(De et al. 2002)
Remoción biológica de materia orgánica, Nitrógeno y Fósforo en un sistema tipo anaerobio-anóxico-aerobio	87,7	83,5	(González y Saldarriaga 2008b)
Remoción de Fósforo de efluentes de lagunas de estabilización empleando lodo de estaciones de tratamiento de agua		90	(Duarte y Hernández 2015)
Evaluación de la Remoción de Nitrógeno, Fósforo y Sulfuros en Agua Residual Doméstica, Utilizando Phragmites australis en Biorreactores	13	60 a 90	(Correa-Torres et al. 2015)
Remoción biológica de nutrientes en aguas residuales urbanas	88,6	89,5	(Hernández,

---

con fotobiorreactores utilizando microalgas

Vásquez, y Álvarez

2016)

---

Resultados obtenidos mediante investigación (elaboración propia).

La tabla 13, refleja la comparación en cuanto a la efectividad para la remoción de Nitrógeno y Fosforo del tratamiento planteado, frente a otras tecnologías enfocadas hacia el mismo fin. Se evidencian resultados positivos por encima del 98% para ambos adsorbentes (TC Y SSCS) con respecto a la reducción de Nitratos en el agua residual, lo que demuestra superior eficiencia, ya que la mayoría de tecnologías investigadas como se logra observar, solo alcanzaron a remover entre un 60 y 90% de dicho nutriente.

En el caso de los Fosfatos el rendimiento en la remoción por parte de los dos tipos de adsorbentes, se comportó de forma diferente, debido a que no presentaron la misma efectividad. Sin embargo, existieron grandes remociones, porque el adsorbente a base de tallos calcinados arrojó una remoción de un poco más del 90%, mientras que las SSCS registraron una remoción del 88,71%. Comparando estos datos, se resalta que los TC estuvieron por encima de todas las remociones del resto de tecnologías consultadas, por otra parte, aunque las SSCS son superadas simplemente por tres tecnologías (ver tabla 13), se demuestra a través de los resultados que su eficiencia en la eliminación de fosfatos en el agua residual es significativa.

Analizando los resultados descritos de las tecnologías examinadas en la literatura, se logra entender, que el tratamiento alternativo experimentado en este proyecto de grado, posee características competitivas frente a otras metodologías en lo que concierne a remoción de nutrientes en los efluentes. Conociendo esto, se espera que el presente estudio sirva como insumo necesario para futuras investigaciones enfocadas en el tratamiento de vertimientos, realizadas por el distrito o por cualquier entidad privada, contribuyendo con un desarrollo sostenible en el ámbito ambiental.

### 8.10. Análisis de resultados

Duarte y Hernández realizaron una solución a base de semillas de *moringa* sometiéndolas a un proceso de licuado con agua destilada y posterior filtrado, con la cual obtuvieron una exitosa remoción de fósforo en agua residual. De igual forma Caldera et al. Mediante un tratamiento similar estudió la efectividad de las semillas de Moringa Oleífera como coagulante alternativo en la potabilización del agua, Galindo por su parte, junto con Sotto y Artunduaga dentro su proceso de tratamiento llevaron a cabo el hervido y tamizado de las cascara de las semillas con el fin adsorber cromo hexavalente de efluentes líquidos, registrando remociones positivas del metal. En el presente estudio los tratamientos fueron diferentes, ya que los materiales vegetales se sometieron a triturado, secado y calcinado, es decir no se realizaron procesos de licuado, hervido y tamizado de las semillas y tallos.

Otros investigadores como Mas y Rubí, Carrasquero y Martínez utilizaron las semillas *moringa oleifera* para comprobar su eficiencia como coagulante orgánico en la remoción de metales en aguas de baja turbiedad; parte del método consistió en pulverizar en granos finos las semillas secas y sin cascara con un molino eléctrico Modelo 4-E Grindin Mill 89 rpm. En este caso los residuos vegetales fueron cortados con un cuchillo y triturados con un mortero, hasta ser reducidos a un menor tamaño. Después se calcinaron y fueron triturados nuevamente, obteniéndose tamaños pequeños y finos del adsorbente.

Galindo, Sotto y Artunduaga obtuvieron excelentes resultados en la remoción de metales pesados (Cr) en aguas residuales, preparando un adsorbente a partir de la cascara de semilla de moringa oleífera, sometiendo la cascara a tratamientos físicos bastante básicos, como lo fueron procesos coordinados de lavado, hervido, secado, molienda y tamizado. Fayos, Arnal y Alandia prepararon para su investigación dos tipos de adsorbentes, el primero a partir de la cascara de la semilla de moringa oleífera, sometiéndola a un proceso y tratamientos físicos (procesos de molienda, tamizado, lavado, hervido y secado); el segundo biosorbente se preparó a partir de la madera, obteniendo carbón, que posteriormente fue sometido a procesos físicos (secado, hervido, molido, tamizado). Se activó químicamente utilizando ácido fosfórico. Los cuales arrojaron resultados positivos en la eliminación de los siguientes metales (Ni, Cu y Cr).

Cahuasquí (2016) por su parte realizó la preparación del adsorbente en 5 pasos, el primero lavado de las semillas con agua destilada, con el fin de remover polvo e impurezas superficiales que pudieran afectar las muestras, posterior al lavado se dejó secar a temperatura ambiente por un lapso de 24 horas, se realizó un primer secado en un horno a 115°C por 24 horas, en la cual se eliminaron contaminantes volátiles presentes en la semilla, para la trituration se usó un mortero de porcelana y en el tamizado se hizo separación de 2 tamaños de muestras; los análisis y resultados obtenidos fueron positivos para la remoción de metales pesados (Ni, Cu y Cr).

Experimentalmente se evaluó la capacidad de remoción de cada uno de los adsorbentes; SSCS, SSCC, SCCS, SCCC, TS y TC (observar nomenclatura en la sección de metodología). A través de la validez de los resultados obtenidos, se logró comprobar, que los adsorbentes a base de SSCS y de TC fueron los que mejores rendimientos mostraron a lo largo del proceso, sin embargo, al momento de determinarse las condiciones óptimas de trabajo de ambos a diferentes dosificaciones, se observó un comportamiento ineficiente.

Al parecer existen variaciones en el pH del agua aparentemente debido a la adición de los adsorbentes, lo cual interviene en la concentración de los fosfatos (observar tabla 8) (Huitrón, 2009). También la metodología realizada para elaboración de los adsorbente pudo influir en el éxito de los resultados, en el presente proyecto de grado no se realizaron algunos procesos como los descritos en el anterior análisis, lo cual indica que los materiales vegetales se sometieron a un tratamiento sencillo.

Además se ha demostrado que las condiciones inadecuadas de almacenamiento de las semillas, puede propiciar el ataque de agentes patógenos, ocasionando un envejecimiento de los materiales vegetales, incluso generando su pudrición, afectando sus propiedades originales; esto pudo influir en los ensayos de remoción de la presente investigación, ya que los adsorbentes se almacenaron por un largo tiempo en condiciones no idóneas, lo que posiblemente alteró sus características, y al entrar en contacto con el agua residual no actuaron como adsorbentes, sino como aportantes de nutrientes, alterando las concentraciones de estos en el agua (Torral, Reino, & Santana, 2013).

Estadísticamente se determinó, mediante el análisis de varianza ANOVA, que el tiempo de experimento influyó en forma altamente significativa en la remoción de fosfatos en el agua residual domestica, mientras que, en la muestra inicial de agua residual industrial, se encontró que los tratamientos, tiempo y los tipos de adsorbentes no causan un efecto significativo en el porcentaje de remoción de fosfatos y nitratos, a su vez mediante la aplicación de la prueba de Kruskal Wallis se estableció, que no se puede determinar cuál es el mejor adsorbente.

Posteriormente en la segunda muestra de agua residual industrial, ANOVA determinó que los tipos de adsorbentes influyeron significativamente, ocasionando que los porcentajes de remoción sean diferentes. En la tercera y ultima muestra de este mismo tipo de agua residual, según la prueba estadística el tratamiento, los tipos de adsorbentes y el tiempo son variables que no afectan el porcentaje de remoción.

## 9. Conclusiones

Con la ejecución de este proyecto de grado se determinaron las condiciones óptimas para el trabajo con semillas y tallos de *Moringa Oleífera* como adsorbente de nitrógeno y fosforo; evaluando su capacidad de remoción en aguas residuales con alto contenido de los mencionados nutrientes, de esta forma desarrollando y comparando la eficiencia del tratamiento alternativo planteado con actuales tecnologías empleadas para tal objetivo.

Se logró concluir que las condiciones inadecuadas de almacenamiento de los materiales vegetales, puede ocasionar una pérdida de sus características originales, lo que de igual forma puede influir en su capacidad de remoción de nutrientes en las aguas residuales, incluso alterando las características de ésta última.

A través de los resultados obtenidos en este trabajo de grado se pudo establecer, que el rendimiento en la remoción de Fosfatos y Nitratos en las aguas residuales por parte de los adsorbentes a base de semillas y tallos de *Moringa*, puede depender de varios factores, como: el pH y la temperatura. El tratamiento alternativo planteado alcanzó en determinadas condiciones porcentajes de remoción de 88.71, 90.97 y 98,81 % de nutrientes, lo cual indica que podría ejercer una función similar a la de tecnologías tradicionales utilizadas en la actualidad.



De acuerdo, al análisis de varianza ANOVA, se comprobó estadísticamente que el tiempo de remoción influye significativamente en la remoción de fosfatos cuando se realizan los ensayos con agua residual doméstica, mientras que al usar agua residual industrial influye significativamente el tipo de adsorbente. Se logró a su vez observar que otros adsorbentes mostraron remociones interesantes, con base a esto se puede plantear, que aparte de los dos mejores los demás también servirían de gran utilidad en procesos de remoción, siempre y cuando se realice un tratamiento adecuado del material.

Para completar los estudios y análisis de los resultados obtenidos, las comparaciones realizadas con tecnologías propuestas, por diferentes investigadores, concluyen resultados positivos, con las alternativas presentadas, coincidiendo en las incidencias de algunos parámetros en los porcentajes de remoción en cada ensayo realizado y resultados analizados; además con estas comparaciones se logró evidenciar la importancia que toman las tecnologías investigadas, para dar vía libre a productos que solucionen problemas ambientales, sin que estos produzcan problemas derivados o remanentes de su uso, para la salud humana o el medio ambiente.

De igual forma, se concluye que existe la necesidad de enriquecer el presente proyecto, mediante una investigación que sustente el bajo costo productivo sobre la elaboración de los adsorbentes y de fe sobre la rentabilidad económica, beneficios sociales y ventajas ambientales, que generaría el tratamiento alternativo planteado para remoción de fosfatos y nitratos sobre los vertimientos de aguas residuales, frente al alto costo operacional y desventajas de las tecnologías tradicionales actualmente usadas para el mismo fin en la industria.

## 10. Recomendaciones

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el transcurso de este proyecto, las recomendaciones que surgen para mejorar la eficiencia en la adsorción de los materiales vegetales utilizados, en futuras investigaciones enfocadas en la remoción de Fosfatos y Nitratos de las aguas residuales son:

Realizar la caracterización del agua residual usada antes y después de los ensayos de remoción, cerciorarse de que posea alto contenido de nitratos y fosfatos, verificar que el pH de la misma sea de 9, pues este, según la literatura citada es el parámetro que mayor beneficia la adsorción de fosfatos.

La metodología de procesamiento, en la que se recomienda monitorear constantemente la calcinación del material para evitar combustión, además que la trituration de las semillas y tallos de *Moringa* se efectúe a fin de obtener granos finos y posteriormente tamizarlos, las dosificaciones y los tiempos de floculación son igual de importantes y van de la mano, por ello es necesario trabajar con los que se obtuvieron mejores adsorciones.

Se recomienda monitorear constantemente el almacenamiento de los adsorbentes, con el fin de garantizar de que estos mantengan su aspecto seco y no tiendan a humedecer en el transcurso del tiempo.

Profundizar los ensayos de remoción en distintas condiciones de dosificación, tipos de aguas residuales, tiempos de floculación y pH, con el fin de verificar experimentalmente, si estas variables pueden afectar el rendimiento en los resultados de adsorción de fosfatos y nitratos de cada uno de los adsorbentes, especialmente de los dos mejores; TC y SSCS.

## 11. Referencias

- Alcaldía Mayor de Bogotá. (2013). Concentraciones de referencia para los vertimientos industriales realizados a la red de alcantarillado y de los vertimientos industriales y domésticos efectuados a cuerpos de agua de la ciudad de Bogotá Primer informe, *1*, 163.
- Alegria, C. F. M., Salamanca, M. L. G., Rojas, C. M., & Concha, J. P. P. (2016). Efecto de la Moringa Oleífera en el Tratamiento de Aguas Residuales en el Cauca, Colombia. *INGRESAR A LA REVISTA*, *14*(2).
- Altamirano Ortega, J. J., Castellón Cruz, F. J., & Valdivia Huete, H. A. (2016). *Crecimiento económico y su impacto ambiental en el Municipio de La Trinidad en la actualidad*. Recuperado a partir de <http://repositorio.unan.edu.ni/2022/1/17360.pdf>
- Arábiga, P., & Oeste, Á. (2013). Moringa oleifera ; Importancia , Funcionalidad y Estudios Involucrados. *Revista Científica de la Universidad Autónoma de Coahuila*, *5*(9), 25-30.
- Avelino, F. D. M., Novelo, R. M., & Dávila, M. T. (2009). Tratamiento de Aguas Residuales de Rastro Mediante Semillas de Moringa Oleifera Lam como Coagulante. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, *10*(3), 523-529.
- Bash, E. (2015). *Evaluación de la Semilla de Moringa Oleifera como Coadyudante en el Proceso de Coagulación para el Tratamiento de Aguas Naturales del Rio Bogotá en su paso por el Municipio de Villapinzón, Cundinamarca. PhD Proposal*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- BM Editores. (2016). Fósforo, un Problema Mundial Urgente | BM Editores. Recuperado 28 de diciembre de 2016, a partir de <http://bmeditores.mx/problema-urgente/>
- Cahuasquí Jaime. (2016). Estudio cinético de adsorción de Cu, Ni y Cr utilizando semillas de moringa oleifera como adsorbente y su aplicación en el tratamiento de aguas Ensayo o

artículo académico .

- Calceta, L. A. C. D. E., Cristina, M., & Bravo, G. (2016). Tesis previa la obtención del título de ingeniero en medio ambiente. Eficiencia de Consorcios Microbianos (in Vitro) en el Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas de la Ciudad de Calceta.
- Caldera, Y., Caldera, Y., Mendoza, I., Briceño, L., García, J., & Fuentes, L. (2010). Eficiencia de las Semillas de Moringa Oleifera como Coagulante Alternativo en la Potabilización del Agua. *Boletín del Centro de Investigaciones Biológicas*, 41(2). Recuperado a partir de <http://www.produccioncientificaluz.org/index.php/boletin/article/view/76>
- Camareno, M. V., & Esquivel, L. G. R. (2006). Aprovechamiento de algunos materiales en el desarrollo de coagulantes y floculantes para el tratamiento de aguas en Costa Rica. *Revista Tecnología en Marcha*, 19(4), 37. Recuperado a partir de [http://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec\\_marcha/article/view/37](http://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/37)
- Camargo, J. A., & Alonso, A. (2007). Contaminación por nitrógeno inorgánico en los ecosistemas acuáticos: problemas medioambientales, criterios de calidad del agua, e implicaciones del cambio climático. *Revista Ecosistemas*, 16(2), 98-110. <https://doi.org/10.7818/457>
- Canjura, K., & Lemus, J. (2003). *Propuesta de un Sistema de Tratamiento para las Aguas Residuales provenientes de Lavaderos Públicos del Municipio de Nejapa*.
- Carmona Marzabal, D. (2015). Planta depuradora de aguas residuales mixta para una población o grupo de poblaciones de más de 100.000 habitantes equivalentes.
- Cauca, V., Andrade, H. J., Segura, M. A., & Varona, J. P. (2015). Estimación de huella de carbono del sistema de producción de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) en Palmira, Valle del Cauca, Colombia., 19-28.

- Cecilia, S., & Romero, C. (2012). Evaluación de la Capacidad de Adsorción en la Cáscara de Naranja (*Citrus Sinensis*) Modificada con Quitosano para la Remoción de  $\text{Cr}(\text{VI})$  en Aguas Residuales Luz Ercilia Garcés Jaraba.
- Cervantes-Carrillo, F., & Pérez, J. (2000, enero). Avances en la eliminación biológica del nitrógeno de las aguas residuales. *REVISTA*, 82. Recuperado a partir de <http://www.medigraphic.com/pdfs/lamicro/mi-2000/mi002e.pdf>
- Del, B., Por, C., Alga, E. L., Pretratada, M., P, J. R., H, N. T., ... D, H. G. (2002). Bioadsorción del  $\text{Cu}(\text{II})$  por el Alga Marina Pretratada *Grateloupia Doryophora* (Rhodophyta), (11), 75-79.
- Diarioecologia.com. (2015, junio). Secreto de mas de 4000 años para potablizar agua podria salvar millones de vidas | Diario Ecologia. Recuperado a partir de <http://diarioecologia.com/secreto-de-mas-de-4000-anos-para-potablizar-agua-podria-salvar-millones-vidas/>
- Diaz, E., Alvarado, A., & Camacho, K. (2012). El tratamiento de agua residual doméstica para el desarrollo local sostenible: el caso de la técnica del sistema unitario de tratamiento de aguas, nutrientes y energía (SUTRANE) en San Miguel Almaya, México. *Redalyc*, 78-97.
- Doménech Roldán, J. M. (2017). Calidad José Manuel Domenech Roldán Profesor de Economía y Administración de Empresa Página: 1. *Calidad. ¿Qué es AMFE?*, 1-7.
- Duarte, D. D., & Hernández, L. F. R. (2015). Remoción de nutrientes mediante coagulantes naturales y químicos en planta de tratamiento de aguas residuales, Valledupar Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental (RIAA)*, 6(2), 183-196.
- Fayos, B. G., ArnalArnal, J., & Alandia, S. (2012). Estudio de la descontaminación de efluentes líquidos con elevada concentración de metales pesados mediante bioadsorbentes de

- Moringa Oleífera. *Instituto de Seguridad*. Recuperado a partir de [http://www.aepro.com/files/congresos/2012valencia/CIIP12\\_1098\\_1108.3785.pdf](http://www.aepro.com/files/congresos/2012valencia/CIIP12_1098_1108.3785.pdf)
- Fer, N. (2003). Caracterización del Agente Coagulante Activo de las Semillas de Moringa Oleífera Mediante HPLC, *37*(1), 35-43.
- Fernando, I., & Quintero, P. (2017). La fitoremediación para el tratamiento de aguas de piscinas  
Phytoremediation for the treatment of swimming pool water, *XXXVIII*(3), 101-113.
- Fried, S., Mackie, B., & Nothwehr, E. (2003). *Nitrate and phosphate levels positively affect the growth of algae species found in Perry Pond* (Vol. 4). Recuperado a partir de [https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/47385895/33-118-1-PB.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1538548146&Signature=dHBgpUor7hxGm5ZAx7Fr%2FqJle%2FU%3D&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DNitrate\\_and\\_phosphate\\_levels\\_p](https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/47385895/33-118-1-PB.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1538548146&Signature=dHBgpUor7hxGm5ZAx7Fr%2FqJle%2FU%3D&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DNitrate_and_phosphate_levels_p)
- Galindo, L. A. L., Sotto, M. A., & Artunduaga, O. F. (2015). Remoción de Cromo Hexavalente utilizando cáscara de Moringa Oleífera como bio-adsorbente. *Revista Nova*, *1*(1).
- García, F. O. (1996). El Ciclo Del Nitrogeno En Ecosistemas Agrícolas. *Curso de capacitación y actualización para profesionales en fertilidad de suelos y fertilización*, *2*(140), 30-39.
- García Albacete, M. (2014). Residuos orgánicos como fuentes de fósforo.
- Geoff, F., & John, S. (1998). Moringa Oleífera un árbol con enormes potencialidades, *5*, 5.
- Gómez M., F., & Salazar G., L. (2016). Evaluación de la eficiencia de semillas de Moringa oleífera lam. Como coagulante natural en la ciudad de Pasto - Colombia. *Vitae*, *23*, S708-S712.
- González, M., & Saldarriaga, J. (2008). Remoción biológica de materia orgánica, nitrógeno y fósforo en un sistema tipo anaerobio-anóxico-aerobio. *Revista EIA*, (10), 45-53. Recuperado

a partir de <http://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/2968036.pdf>

- Haro, S., & Perales, J. A. (2015). Cinética de consumo de nutrientes y crecimiento de un bloom de microalgas en un fotobiorreactor High Rate Algae Pond (HRAP). *Tecnología y ciencias del agua*, VI, 15-31.
- Huitrón, R. M. P. (2009). Estudio de la adsorción de fosfatos en aguas de depuradora mediante intercambiadores iónicos, 80.
- Infantil, S. A., Quiroga, D., Fern, R., Paris, E., Aires, B., Ambiente, M., & Ambiental, S. (2010). *Salud Ambiental Infantil*.
- Jadhav, M. V., & Mahajan, Y. (2012). Study on locally available coagulant (Moringa Oleifera) for removal of turbidity from water. *Journal of Environmental Reserach & Development*, 7(1), 361-367.
- Jiménez, B. E. (2001). *La Contaminación Ambiental en México*.
- L. G. Hernández-Bárcenas, M. S. Berber-Mendoza, M. G.-G. (2017). Adsorción de fosfatos por medio de una zeolita modificada, 9142654.
- Landa, A. G., Zapata, L. B., Flores, G. C., & Charcape, D. M. (2015). Acción Antimicrobiana de la Pterigospermina de Moringa Olífera sobre los Contaminantes del Agua y su Efecto en el PH, Turbidez y Crecimiento Microbiano. *Revista Electrónica de la Facultad de Ingeniería*, 3(1), 11-19.
- Lavie, E., Morábito, J. A., Salatino, S. E., Bermejillo, A., & Filippini, M. F. (2010). Contaminación por fosfatos en el oasis bajo riego del río Mendoza. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 42(1), 169-184.
- Lédo, P. G. S., Lima, R. F. S., & Paulo, J. B. A. (2009). Estudio Comparativo de Sulfato de Aluminio y Semillas de Moringa oleifera para la Depuración de Aguas con Baja Turbiedad



Comparative Study of Aluminum Sulfate and Moringa oleifera seeds as Coagulants in the Clarification of Water with Low Turbidity, *20*(5), 3-12.

<https://doi.org/10.1612/inf.tecnol.4096it.08>

Martha, M., Arreola, S., Ramón, J., & Canepa, L. (2014). Moringa oleifera una alternativa para sustituir coagulantes metálicos En *El Tratamiento De Aguas Superficiales*, *17*(2), 101.

Mas y Rubí, M., Carrasquero, S., & Martínez, D. (2013). Eficiencia de las semillas Moringa oleifera como coagulante orgánico en la remoción de metales en aguas de baja turbiedad Efficiency of the moringa oleifera seeds as organic coagulant for metal removal in low turbidity wastewaters, 27-37.

Matilainen, A., Vepsäläinen, M., & Sillanpää, M. (2010). Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, *159*(2), 189-197. <https://doi.org/10.1016/J.CIS.2010.06.007>

Mazzucchelli, M. G. (2016). Diagnóstico físico químico y microbiológico del agua superficial del área serrana del arroyo Napaleofu, 149.

Mendoza, I., Fernández, N., & Ettiene, G. (2000). Uso de la Moringa oleifera como coagulante en la potabilización de las aguas Use of Moringa oleifera as coagulant in the water treatment. *Ciencia* 8, 8(August), 235-242.

Miguel, G., S, V., M, I, I., J, C, V., & R, V. (2012). Evaluación del uso energético de la Moringa oleífera. *Revista Agroforestería Neotropical*, *2*(1), 58.

Milagros, Z., & Trujillo, G. (2012). *Comparación y Evaluación de tres Plantas Acuáticas para Determinar la Eficiencia de Remoción de Nutrientes en el Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas*. Recuperado a partir de [http://repositorio.uni.edu.pe/bitstream/uni/1292/1/garcia\\_tz.pdf](http://repositorio.uni.edu.pe/bitstream/uni/1292/1/garcia_tz.pdf)

Mora, J. S., & Gacharná, N. (2015). El árbol milagroso: la moringa oleifera. *Biodiversidad Colombia*, 0(5), 49-58.

Moreno, A., Figueroa, D., & Hormaza, A. (2012). Diseño estadístico para la remoción eficiente del colorante rojo 40 sobre tusa de maíz\* Statistical design to efficiently remove red 40 dye on corn cobs Desenho estatístico para a remoção eficiente do corante vermelho 40 sobre espiga de milho. *Producción + Limpia*, 7(2), 9-19.

Moreta Pozo. (2008). *La Eutrofización de los Lagos y sus Consecuencias*. Ibarra 2008.

Recuperado a partir de [https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/11024504/06](https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/11024504/06nut_099)  
nut 099

tesis.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1532745984&Signature=cSoxvmttOvYTNug%2F21u2DQprVbc%3D&response-content-  
disposition=inline%3B filename%3DLa\_eutrofizacion\_de\_l

Orozco Jaramillo, A. (2005). *Bioingeniería de aguas residuales : teoría y diseño*. Acodal.

Recuperado a partir de

[https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=t5w5EZf1VhMC&oi=fnd&pg=PP17&dq=bio](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=t5w5EZf1VhMC&oi=fnd&pg=PP17&dq=bioingeniería+de+aguas+residuales&ots=MxV3gzCxUb&sig=Lu2IcMNF55HGq4QSWKnnv3UL_k#v=onepage&q=bioingeniería+de+aguas+residuales&f=false)  
ingeniería+de+aguas+residuales&ots=MxV3gzCxUb&sig=Lu2IcMNF55HGq4QSWKnnv  
3UL\_k#v=onepage&q=bioingeniería de aguas residuales&f=false

Pacheco-Avila, J., Pat-Canul, R., & Cabrera-Sansores, A. (2002). Análisis del ciclo del nitrógeno en el medio ambiente con relación al agua subterránea y su efecto en los seres vivos.

*Ingeniería*, 6(3), 73-81. <https://doi.org/10.1109/ICCSN.2011.6013626>

Pacheco, J., Pat, R., & Cabrera, A. (2002). Análisis del ciclo del nitrógeno en el medio ambiente con relación al agua subterránea y su efecto en los seres vivos. *Ingeniería*, 6(3), 73-81.

<https://doi.org/10.1109/ICCSN.2011.6013626>

- Paper, C., & Acosta, A. (2016). Remoción de Nitratos y Fosfatos de Aguas Residuales de Tratamiento Primario Empleando la Microalga *Dunaliella Salina*, (August 2007).
- Pérez, A., Sánchez, T., Armengol, N., & Reyes, F. (2010). Características y potencialidades de *Moringa oleifera*, Lamark: Una alternativa para la alimentación animal. *Pastos y Forrajes*, 33(4), 1-1.
- Pérez, M., & Cabrera, L. (2015). Actividad Antibacteriana In Vitro de Extractos Acuoso de *Moringa Oleifera* sobre Especies Patógenas Intrahospitalarias in Vitro Antibacterial Activity of *Moringa Oleifera* Aqueous Extracts on Hospital Pathogenic Species, 5, 141-145.
- Restrepo, H. A. (2009). Evaluación del Proceso de Coagulación-Floculación de una Planta de Tratamiento de Agua Potable. *Universidad Nacional de Colombia*, (Tratamiento de Aguas), 1-107.
- Rivas, Z., Sánchez, J., Troncone, F., Márquez, R., De Medina, H. L., Colina, M., & Gutiérrez, E. (2009). Nitrógeno y fósforo totales de los ríos tributarios al sistema lago de maracaibo, Venezuela. *Interciencia*, 34(5), 308-314.
- Roa-Parra, A. L., & Cañizares-Villanueva, R. O. (2012). Bioremediación de aguas con fosfatos y nitratos utilizando *Scenedesmus incrassatulus* inmovilizado, 10(1), 71-79.  
<https://doi.org/10.24054/01204211.V1.N1.2012.50>
- Rodríguez, C. H. (2015). El Instituto De Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 9.  
Recuperado a partir de <http://www.ideam.gov.co/>
- Rodríguez, S., Muñoz, R., García, O., & Fernández, E. (2005). Empleo de un producto Coagulante Natural para Clarificar Agua. *Revista CENIC Ciencias Químicas*, 36, 8.
- Roxanna, A., & Marengo, M. (2013). Estudio de Diferentes Bioadsorbentes como Posibles Retenedores de Fosfatos en Aguas.

Saavedra. (2016). " Remoción de Fósforo en Aguas Utilizando Cal Artesanal.

Sales, P. M. (2013). Diagrama de Pareto. Recuperado a partir de

[https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/44144377/Diagramde\\_pareto.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1509470247&Signature=3ZIyQB YMHwT3N0H%2BM5JxsaMG69A%3D&response-content-disposition=inline%3B filename%3DDiagrama\\_de\\_Pareto.pdf](https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/44144377/Diagramde_pareto.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1509470247&Signature=3ZIyQB YMHwT3N0H%2BM5JxsaMG69A%3D&response-content-disposition=inline%3B filename%3DDiagrama_de_Pareto.pdf)

Segura, L. E. (2007). Estudio de antecedentes sobre la contaminación hídrica en Colombia.

*Escuela superior de administración pública ESAP*, 142.

Service, O. S. U. E., Iida, C. L. (Chelsey L. ., & Shock, C. C. (Clinton C. . (2009). El dilema del fósforo.

Smith, V. H., Tilman, G. D., & Nekola, J. C. (1999). Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems. *Environmental Pollution*, 100(1-3), 179-196. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(99\)00091-3](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(99)00091-3)

Toral, O., Reino, J., & Santana, H. (2013). Morphological characterization of eight *Moringa oleifera* ( Lam .) provenances under nursery conditions. *Pastos y Forrajes*, 36(4), 417-422. Recuperado a partir de [http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S0864-03942013000400002&script=sci\\_arttext&tlng=pt](http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S0864-03942013000400002&script=sci_arttext&tlng=pt)

Urcola, L. (2012). Pasado, presente y futuro de tecnologías para la eliminación de nutrientes en EDAR. *Ingeniería civil*, 81-92. Recuperado a partir de [http://hispagua.cedex.es/sites/default/files/hispagua\\_articulo/Ingcivil/P-081-092.pdf](http://hispagua.cedex.es/sites/default/files/hispagua_articulo/Ingcivil/P-081-092.pdf)

Villa, S. (2008). «Caracterización de la cáscara de naranja para su uso como material bioadsorbente.», 57(7), 1-23.

Villanueva, C., & Nelson, H. (2005). Bioadsorción de Cu ( ii ) por Biomásas que Contienen

Pectina, 8(Ii), 11-15.

Villaseñor-basulto, D. L., Juan, R., & Rojas, P. (s. f.). Remoción de Ciprofloxacina presente en

Aguas Sintéticas empleando Moringa oleífera como Coagulante Natural, 1-29.



## 12. ANEXOS



Figura 15. Lugar de recolección, (semillas y tallos) (elaboración propia).



Figura 16. Árboles productores (semillas) (elaboración propia).





Figura 17. Plantas productoras (tallos) (elaboración propia).



Figura 18. Tallos recolectados (elaboración propia).





Figura 19. Semillas recolectadas (sin cascara) (elaboración propia).



Figura 20. Semillas molidas (sin cascara) (elaboración propia).





Figura 21. Semillas con cascara triturada (elaboración propia).



Figura 22. Tallos secos (elaboración propia).



Figura 23. Semilla sin cascara, semilla con cascara y tallo seco (elaboración propia).



Figura 24. Tipos de adsorbentes (elaboración propia).

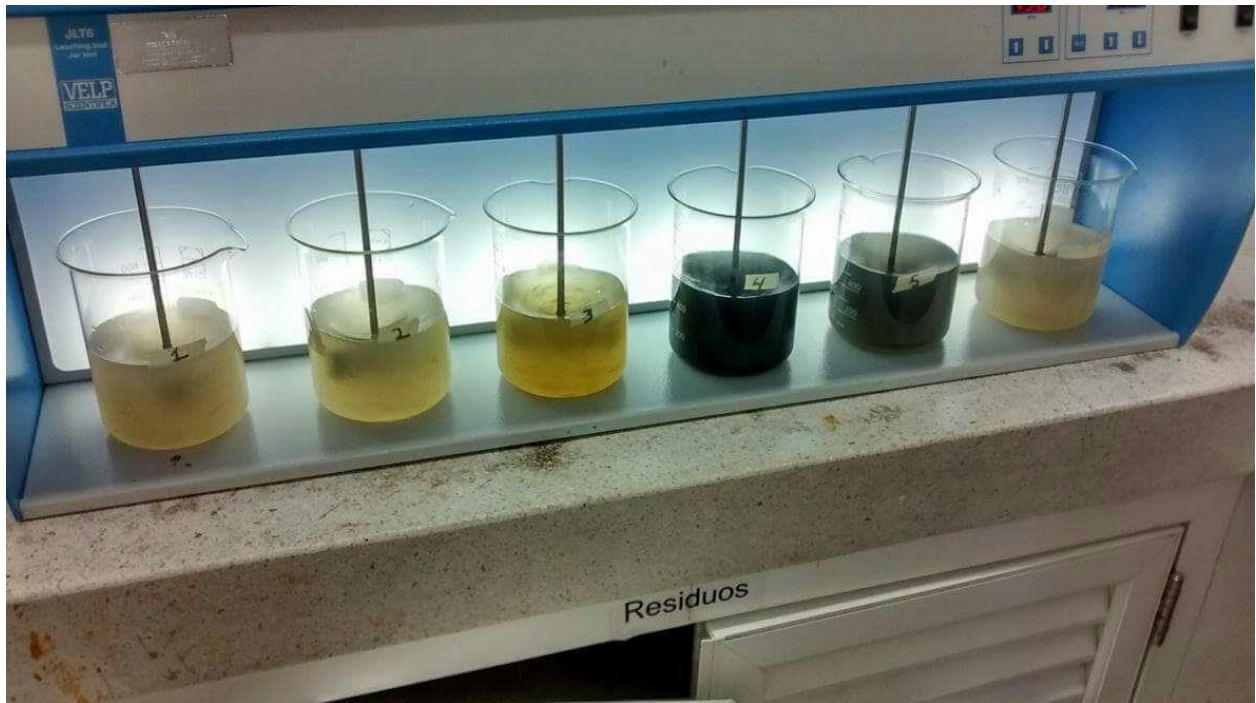


Figura 25. Prueba de jarra para los adsorbentes (elaboración propia).